



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## **Evaluación del potencial energético del oleaje en Madagascar**

Treball realitzat per:

**Giovanni Araujo Roso**

Dirigit per:

**Octavio César Möso Aranda**

**Joan Pau Sierra Pedrico**

Tutor extern:

**Alberto Pérez Ortiz**

Grau en:

**Enginyeria d'Obres Públiques**

Barcelona, 21 de Septembre de 2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**



## Agradecimientos

*En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, César Mössö. Gracias por confiar en que pudiera sacar este proyecto hacia delante y soportar, durante todos estos meses, mis incesantes consultas, aunque estuvieras con el trabajo hasta el cuello. Ha sido un verdadero placer ser tu alumno y poder trabajar contigo después en este proyecto, sinceramente he aprendido mucho de ti y gracias a profesores como tú he descubierto que mi pasión es la ingeniería marítima.*

*También me gustaría agradecer a Joan Pau Sierra por estar al pie del cañón junto con nosotros. Siempre resolviendo mis dudas, atendiendo mis consultas en cualquier momento que se preciaba y por guiarme en el proceso de análisis de datos. Además, al igual que César, has sido uno de los profesores que me han hecho descubrir mi gran pasión en la ingeniería.*

*No querría olvidarme de Alberto Pérez, codirector de este TFG, por resolver todas mis dudas y proporcionarme una cantidad amplia de información que ha servido para tirar este trabajo hacia delante. Su experiencia en el campo de las energías renovables ha sido como un haz de luz revelador en este proyecto.*

*Querría mencionar, también, a todos aquellos amigos que me habéis soportado durante todo este tiempo de estrés, tanto a los que estáis aquí como a los que no. Sobre todo, a aquellos que me han resuelto dudas y me han ayudado cuando no sabía cómo avanzar, aunque eso significara quedar y tirarnos horas y horas para resolver algo.*

*Finalmente, a mi madre que durante todo este tiempo de trabajo siempre ha estado preocupándose por mi trabajo, por cómo lo llevaba y en que cuidara de mi salud, aunque tuviera que dedicarle al trabajo tantas horas. Gracias por tu comprensión, por entender que este trabajo es la culminación de nuestro esfuerzo, de todo el sacrificio; especialmente el tuyo desde que nací; que hemos hecho durante tantos años desde que empecé la universidad. Eres el gran ejemplo a seguir de convicción y perseverancia y estoy donde estoy gracias a ti y a los férreos valores que me has inculcado.*

***¡Muchas gracias a todos, esto no podría haber sido nada sin vosotros!***

---

*“El mar es la gran reserva de la naturaleza. El mundo, por así decirlo, comenzó en el mar, y quién sabe si no terminará en él. En él está la tranquilidad suprema. El mar no pertenece a los déspotas. En su superficie, aún pueden ejercer sus inicuos derechos, pelearse, devorarse y transportar todos los horrores terrestres, pero a treinta pies de profundidad, su poder cesa, su influencia se extingue y su imperio desaparece. ¡Ah, señor, viva usted en el seno de los mares! ¡Solo ahí existe la independencia! ¡Ahí no reconozco señor alguno! ¡Allí soy libre!”*

**Julio Verne**, *“Veinte mil leguas de viaje submarino”* (1870)

## Índice General

Índice de figuras .....	1
Índice de tablas .....	2
Resumen.....	3
Abstract .....	4
1. Introducción .....	5
1.1. Motivación .....	5
1.2. Objetivo .....	6
1.3. Estructura de la tesina.....	6
2. Descripción del estado del arte.....	8
2.1. Energías renovables .....	8
2.2. Introducción a las energías renovables basadas en el mar.....	8
2.2.1. Energía mareomotriz.....	9
2.2.2. Energía térmica oceánica .....	11
2.2.3. Energía de las corrientes .....	11
2.2.4. Energía osmótica o energía azul.....	15
2.2.5. Energía undimotriz .....	16
2.3. WECs.....	17
2.3.1. Ubicación.....	17
2.3.2. Tipo de captación .....	18
2.3.3. Tamaño y orientación .....	21
2.3.1. Pelamis .....	23
2.3.2. Wave Dragon.....	25
3. Zona de estudio .....	27
3.1. Demografía.....	27
3.2. La energía en Madagascar.....	29
3.2.1. Energías renovables más importantes en Madagascar .....	29
3.2.2. Estado de las infraestructuras energéticas en Madagascar.....	31
3.3. Batimetría.....	37
3.3.1. Costa sur.....	38
3.3.2. Costa sureste .....	39
3.3.3. Costa este .....	40
3.3.4. Costa noreste .....	42
4. Metodología .....	44
4.1. Datos utilizados. ....	44
4.2. Procesado de datos .....	46

---

4.3. Metodología de cálculo .....	47
5. Resultados .....	50
5.1. Distribución espacial .....	50
5.2. Variabilidad temporal.....	52
5.3. Identificación de las mejores ubicaciones para el despliegue de WECs .....	54
6. Conclusiones.....	62
7. Bibliografía .....	64
Anejos.....	66
Anejo 1. Tablas de encuentros de los estados del mar de los puntos 4 al 9.....	67
Apéndices .....	73
Apéndice 1. Código de extracción de datos de un archivo NetCDF para Matlab .....	74

---

## Índice de figuras

Figura 1. Contribución de distintas fuentes a la energía primaria global según datos del IPCC en 2011 [4].....	9
Figura 2. Generador mareomotriz de corrientes de marea [5] .....	10
Figura 3. Embalse de marea [5] .....	10
Figura 4. Mapa mundial de regiones con altos gradientes térmicos entre superficie y 1 km de profundidad. ....	11
Figura 5. Distribución de las energías basadas en el mar a nivel mundial [6] .....	12
Figura 6. Rotores de eje horizontal [7] .....	12
Figura 7. Rotores de eje vertical [7].....	13
Figura 8. Hidroala oscilatoria [7] .....	13
Figura 9. Tubo de Venturi [7] .....	14
Figura 10. Tornillo de Arquímedes [7] .....	14
Figura 11. Cometa de corriente [7].....	14
Figura 12. Esquema de un depósito de energía osmótica [8].....	15
Figura 13. Primera planta prototipo de energía osmótica en Statkraft.....	16
Figura 14. Clasificación de dispositivos de captación del oleaje en función de la posición relativa a la costa [10] .....	18
Figura 15. Oscilador de columna de agua (OWC) [14] .....	18
Figura 16. Dispositivo sumergido de diferencial de presión [14] .....	19
Figura 17. Sumergido de diferencial de presión: Achimedes Waveswing [12].....	19
Figura 18. Dispositivo de flotación [14] .....	20
Figura 19. Dispositivo de rebase [14].....	20
Figura 20. Dispositivo de impacto [14] .....	20
Figura 21. Aquamarine Power Oyster [12] .....	21
Figura 22. Sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje según tamaño y orientación [18] .....	21
Figura 23. Absorbedor de Energía: OPT PowerBuoy [12] .....	22
Figura 24. Dispositivo Terminador: Salter's Duck [12] .....	22
Figura 25. Pelamis [12].....	22
Figura 26. Modelo Pelamis P2 [20] .....	23
Figura 27. Esquema de funcionamiento del Pelamis. ....	24
Figura 28. Prototipo de Wave Dragon [16] .....	25
Figura 29. Principio de funcionamiento de Wave Dragon [12].....	25
Figura 30. Mapa donde se especifica la situación (en negro) de Madagascar, <a href="http://www.mapa-satelite.com">www.mapa-satelite.com</a> .....	27
Figura 31. Población de Madagascar en los últimos 26 años. ....	28
Figura 32. Producto Interior Bruto (PIB) de Madagascar en los últimos 26 años.....	28
Figura 33. Renta per cápita de Madagascar en los últimos 26 años.....	29
Figura 34. Producción de energía en Madagascar en función del tipo de energía, entre 2002 y 2012 [22].....	29
Figura 35. Distribución de la energía generada según su tipo en Madagascar en 2015 [23] .....	30
Figura 36. Consumo y la Generación total de energía eléctrica en Madagascar, entre 2002 y 2012 [22].....	30
Figura 37. Área cubierta de bosque [22] .....	31
Figura 38. Ubicación de zonas potencialmente geotérmicas en Madagascar [22] .....	33
Figura 39. Lugares con potencial hidroeléctrico en Madagascar [22] .....	34
Figura 40. Irradiación horizontal global en Madagascar [22] .....	35
Figura 41. Atlas de velocidad del viento en Madagascar [27] .....	36

Figura 42. Mapa batimétrico de la costa sur de Madagascar, navionics.com .....	38
Figura 43. Perfil de la costa sur de Madagascar. ....	39
Figura 44. Mapa batimétrico de la costa sureste de Madagascar, navionics.com .....	39
Figura 45. Perfil de la costa sureste de Madagascar.....	40
Figura 46. Mapa batimétrico de la costa este de Madagascar, navionics.com .....	41
Figura 47. Perfil de la costa este de Madagascar.....	42
Figura 48. Mapa batimétrico de la costa norte de Madagascar, navionics.com .....	42
Figura 49. Perfil de la costa noreste de Madagascar. ....	43
Figura 50. Distribución de datos de Tm de SADC. ....	45
Figura 51. Distribución de datos de Tp de SADC. ....	45
Figura 52. Comparación entre los valores de Tp medidos y los obtenidos mediante la regresión. ....	47
Figura 53. Localización de los puntos de estudio, google maps. ....	48
Figura 54. Potencia media anual en los 9 puntos de estudio. ....	50
Figura 55. Potencia direccional media anual para cada punto de estudio.....	51
Figura 56. Fluctuación estacional de energía en los puntos de estudio. ....	52
Figura 57. Potencia media mensual de todos los puntos. ....	54
Figura 58. Tabla de encuentros mostrando la contribución de los varios estados del mar a la energía anual total en el punto 1 (Pelamis arriba y Wave Dragon abajo) en GWh. ....	56
Figura 59. Tabla de encuentros mostrando la contribución de los varios estados del mar a la energía anual total en el punto 2 (Pelamis arriba y Wave Dragon abajo) en GWh. ....	57
Figura 60. Tabla de encuentros mostrando la contribución de los varios estados del mar a la energía anual total en el punto 3 (Pelamis arriba y Wave Dragon abajo) en GWh. ....	58

## Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los distintos modelos de Wave Dragon [16] .....	26
Tabla 2. Consumo anual de madera [24] .....	32
Tabla 3. Mínima distancia entre costa y 1 km de profundidad y diferencial térmico medio anual en Madagascar [22] .....	37
Tabla 4. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa sur de Madagascar.....	38
Tabla 5. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa sureste de Madagascar...40	40
Tabla 6. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa este de Madagascar.....41	41
Tabla 7. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa noreste de Madagascar. .43	43
Tabla 8. Coordenadas de los puntos estudiados. ....	48
Tabla 9. Potencia media anual respecto a las direcciones de oleaje para cada punto de estudio.....51	51
Tabla 10. Potencia media del oleaje en función de la estación del año para cada punto de estudio. ....	52
Tabla 11. Potencia media mensual para cada punto de estudio. ....	53
Tabla 12. Potencia media anual de oleaje y coeficientes de variabilidad temporal en los puntos de estudio. ....	55
Tabla 13. Producción media anual de los dos dispositivos elegidos para los 9 puntos. ....	59
Tabla 14. Factor de capacidad de los dos dispositivos elegidos para los 9 puntos. ....	60
Tabla 15. Tiempo de inactividad/inoperabilidad de ambos dispositivos WEC en un año. ....	60
Tabla 16. Número de dispositivos en función del aumento del acceso a la electricidad. ....	61



### Resumen

La energía undimotriz, o energía del oleaje, es aquella que aprovecha la energía cinética de la perturbación de la superficie del mar y está considerada como una fuente de gran potencial. Las ventajas de este tipo de recurso respecto a otras energías renovables son variadas: sus eventos son predecibles con detalle, el despliegue de dispositivos tiene un impacto visual inferior a otros y es un recurso inagotable, entre otros.

Por otra parte, el campo de la energía del oleaje se encuentra, todavía, en temprana fase experimental. Pocas patentes han sido capaces de llegar a fase comercial, pero aun pudiéndose comercializar siguen optimizándose debido a que su coste es elevado. Por esa razón, la investigación sobre el tema es una de las herramientas más indicadas para identificar qué dispositivo es el mejor con el objetivo de optimizar costes y rendimiento.

La isla de Madagascar, uno de los países insulares más grandes del mundo, situada frente a las costas de Mozambique en el océano Índico parece un lugar idóneo y atractivo para evaluar el potencial energético. Además, no hay estudios previos en el océano Índico de este carácter.

Los datos analizados en el siguiente estudio han sido obtenidos por medio de *ERA Interim*, un modelo numérico y reanálisis utilizado en recientes estudios académicos, con el fin de cuantificar el potencial energético del litoral malgache. A través de estos datos se han determinado los puntos en los que sería más factible la instalación de dispositivos convertidores de la energía del oleaje (WEC). Para el análisis del aporte energético se ha trabajado con dos dispositivos: el *Pelamis* y el *Wave Dragon*.

En los resultados se determina qué ubicaciones son las más adecuadas para instalar un dispositivo WEC, en particular qué punto de los usados en el estudio resulta ser el más factible, a través de la producción energética de la instalación de ambos aparatos y valorada mediante los factores de capacidad y el tiempo de inactividad de los mismos.

## Abstract

The wave energy is the one which takes advantage of the kinematic energy from the sea surface disturbance and it is considered as a great potential resource. The advantages of this kind of resource regarding to other renewable energies are varied: their events are accurately predictable, the device deployment has a lower visual and environmental impact than others and it is an inexhaustible resource, *inter alia*.

On the other hand, the field of the wave energy is still in an early experimental phase. Few patents have been able to reach commercial stage but even if they can be commercialized they continue to be optimized due to their high cost. For that reason, the research about the topic is one of the most indicated tools to identify which device is the best, with the aim of optimizing costs and performance.

The island of Madagascar, one of the biggest island countries in the world, located in front of the Mozambique's costs in the Indian ocean seems a suitable and attractive place to evaluate the energy potential. In addition, there are not previous studies in the Indian ocean of this character.

The data analysed in the following study have been obtained by means of *ERA Interim*, a numerical model and reanalysis used in recent academic studies, in order to quantify the energy potential of the Malagasy coast. Through these data have been determined the points where would be more feasible the installation of Wave Energy Converters (WEC). For the analysis of the energy contribution it has worked with two devices: the Pelamis and the Wave Dragon.

In the results, it is determined which locations are most suitable to install a WEC device, in particular which of the points used in the study proves to be the most feasible, through the energy production of the installation of the both devices and valued by the capacity factors and the idle time.

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

La sociedad en la que vivimos nos brinda muchas oportunidades, pero a su vez nos frustra en otros aspectos. Nacer y crecer en una sociedad que tiene como objetivo hacernos pagar por cosas que deberían ser de primera necesidad, por derecho fundamental, es una de las mayores injusticias a día de hoy. Dentro de las necesidades fundamentales que cito están la vivienda digna, los suministros de agua, luz y gas, la educación y un mínimo de alimentos.

Actualmente, se ve cómo los gobiernos de todo el mundo van progresando en muchos de estos puntos, pero hay uno que siempre se resiste: el tema de las eléctricas, como le llaman. El derecho fundamental de suministrar energía, ni tan siquiera a un precio justo, es una de las polémicas sobre la mesa en nuestra actualidad.

Este tipo de injusticias a pie de calle son una de las mayores motivaciones que me han llevado a hacer un estudio sobre la eficiencia de energías renovables, las cuales son potencialmente eficientes y limpias. Algo que necesita este mundo hoy en día. Tener medios como el aire, el sol e incluso el mar que, de forma natural, proporcionan diversos tipos de energías y no poderles sacar mejor partido es el gran motivo que me mueve.

Dado que el mar es, de este grupo de tres medios, el que aún está lejos del gran avance que hemos logrado comparado con la energía eólica y la solar decidí enfocar el estudio en él. Al principio, la evaluación del recurso energético del oleaje en una zona determinada no era mi objetivo, ya que yo buscaba una forma de hacer más eficientes los distintos dispositivos de conversión energéticas que tenemos y había pensado incluso en algunos diseños. Pero una vez puesto sobre la mesa me di cuenta que no podía llevarlo a cabo a día de hoy, ya que no entiendo de diseño de máquinas y no podría desarrollar mis ideas hasta el nivel profesional que merecen. Por eso me decanté a hacer algo de lo que sí era capaz y que era también necesario en este mundo: estudiar la viabilidad de la energía undimotriz en zonas que necesitarán en un futuro de energías renovable para sobrevivir, tales como islas y/o países en vías de desarrollo, que se verán afectados por el cambio climático y la escasez del petróleo.

Madagascar es sólo el principio, y el propósito del proyecto es más amplio y comprende el hecho de poder servir de inspiración a personas que sí que están en posición de ayudar físicamente o de estudiar más profundamente estas cosas que yo a día de hoy. También incluye la concienciación de que recursos fácilmente accesibles en países del primer mundo pueden llegar a constituir grandes avances a todos los niveles para estos países e islas.

Así que, a fin de cuenta, la motivación que mueve este estudio es el intento de hacer algún día el mundo un lugar mejor donde nadie sufra por comer, por tener agua potable y viviendas dignas, entre otras. Con una optimización de los métodos de obtención de recursos energéticos y con los estudios pertinentes y el asesoramiento adecuado, es posible llegar a un mundo más justo y equilibrado algún día.

### 1.2. Objetivo

El siguiente trabajo de fin de grado se centra, principalmente, en analizar cuán factible es el aprovechamiento de la energía generada por el oleaje en una franja de 100 kilómetros de anchura desde las costas de la República de Madagascar.

Junto a este objetivo principal, podemos hacer hincapié en una serie de objetivos específicos que se lograrán alcanzar también gracias a este estudio:

- Evaluar si la zona de estudio dispone de recurso suficiente como para llegar a producir una cantidad razonable de energía por oleaje.
- Determinar cuáles son las mejores ubicaciones para el uso de este tipo de energía renovable.
- Analizar, a distinta escala, la variabilidad temporal de este tipo de energía: mensual, estacional y anualmente.
- Calcular la cantidad de energía que podría captarse con distintos tipos de Convertidores de Energía o *Wave Energy Converters* (WECs).
- Estimar cuantos hogares o población podrían abastecerse con dichos WECs.

Para alcanzar dichos objetivos, se va a proceder a procesar mediante Matlab datos reanalizados de *ERA Interim*, un modelo numérico y de reanálisis, creado por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Junto con otros datos proporcionados por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) se podrá extraer la información necesaria para proceder, de forma posterior, al análisis de estos datos y determinar el recurso energético disponible en las costas de Madagascar, así como su variabilidad temporal.

En conclusión, una vez obtenida la información energética y temporal se podrá estudiar, calcular y estimar la situación en el litoral malgache y la cantidad de energía con la que se puede abastecer mediante este sistema. De esta manera, se podrá llegar a responder si es factible para el país aprovechar este recurso natural para el desarrollo energético.

### 1.3. Estructura de la tesina

La tesina se ha dividido en 7 capítulos que, aparte de este, son los siguientes:

- El capítulo 2 describe el estado del arte en dos apartados. En el primero de ellos se hace una introducción general de las energías renovables y se explica, con detalle, qué es la energía undimotriz. En el segundo se introduce el término WEC y los tipos de tecnología que existen.
- El capítulo 3 realiza una descripción de la zona de estudio que también se divide en tres apartados. En el primero se detalla la demografía de la República de Madagascar. En el segundo se exponen las condiciones energéticas que hay en el país. En el tercero se muestra la batimetría de las costas de Madagascar.
- El capítulo 4 está dividido en tres secciones en las que se analiza la energía del oleaje en la costa. En la primera se introducen los datos utilizados y su procedencia. En la segunda se muestra el proceso para obtener los parámetros de interés de la energía de cara al análisis de estos. La tercera sección hace referencia a la metodología de cálculo necesario para conocer la producción energética.

- El capítulo 5 se muestran y se discuten los resultados de la producción energética mediante la instalación de los dos dispositivos WEC con los que se ha trabajado y sus respectivos coeficientes.
- El capítulo 6 muestra la discusión de las conclusiones alcanzadas tras analizar los resultados obtenidos.
- El capítulo 7 muestra las múltiples referencias bibliográficas en las que se ha basado el siguiente trabajo.

## 2. Descripción del estado del arte

### 2.1. Energías renovables

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero –causantes del cambio climático- ni emisiones contaminantes. Además, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta, al margen de su volatilidad coyuntural.

Según entidades como Acciona [1], el crecimiento de las energías limpias es imparable, como queda reflejado en las estadísticas aportadas en 2015 por la *Agencia Internacional de la Energía (AIE)* [2]: representan cerca de la mitad de la nueva capacidad de generación eléctrica instalada en 2014, y ya se han constituido en la segunda fuente global de electricidad, sólo superada por el carbón.

De acuerdo a la *AIE*, la demanda mundial de electricidad aumentará un 70% hasta 2040, elevando su participación en el uso de energía final del 18% al 24% en el mismo periodo-espoleada principalmente por regiones emergentes (India, China, África, Oriente Medio y el Sureste Asiático).

El desarrollo de las energías limpias es imprescindible para combatir el cambio climático y limitar sus efectos más devastadores. El 2014 fue el año más cálido desde que existen registros. La Tierra ha sufrido un calentamiento de 0,85°C de media desde finales del siglo XIX, según apuntó el artículo sobre cambio climático de National Geographic España en 2015 [3].

### 2.2. Introducción a las energías renovables basadas en el mar

El planeta Tierra contiene un 70% de superficie acuosa, la cuál es fuente de un gran potencial energético natural que, actualmente, no es aprovechado como es debido. En los últimos años, ha aparecido nueva tecnología que puede llegar a explotar este gran potencial. Además, el cambio climático ha generado la necesidad de encontrar alternativas energéticas a las convencionales (fósil y nuclear) que de forma limpia e inagotable las sustituyan en un futuro: las energías renovables. De forma conjunta con las nuevas tecnologías, estas necesidades han favorecido que las energías que se basan en el océano y el mar comiencen a abrirse paso. No obstante, a día de hoy, aún las fuentes convencionales siguen yendo en cabeza en el sector energético, tal y como muestra la figura 1.

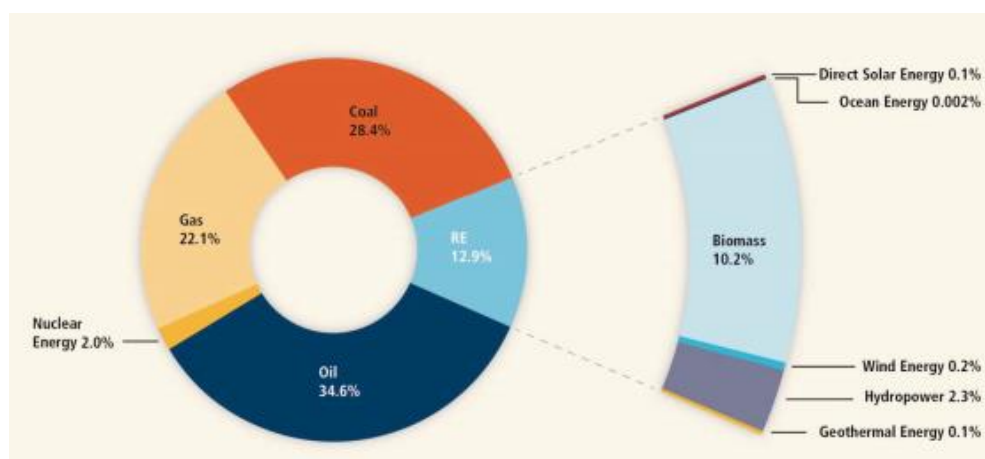


Figura 1. Contribución de distintas fuentes a la energía primaria global según datos del IPCC en 2011 [4]

Como en muchos otros tipos de energía, la energía cinética provocada de forma natural en los fluidos se puede canalizar de forma que produzca un potencial eléctrico. En el caso de los océanos, el movimiento natural de las masas de agua hace de ellos una fuente inagotable de energía. Su aprovechamiento es uno de los objetivos que la Unión Europea se ha propuesto para el año 2020, pretendiendo que el 20% de la energía aportada tengan como origen las energías renovables.

Al igual que la Unión Europea, como se podrá apreciar más adelante, la República de Madagascar tiene como objetivo explotarlas en cualquier momento y ya se han realizado estudios para ver cuán factible es su aprovechamiento.

No sólo la energía cinética de las masas acuosas es aprovechable, también podemos extraer energía de sus cambios de temperatura o presión. A día de hoy, algunas ya son explotadas y otras están en fase de pruebas o lo llegarán a estar en un futuro cercano. Dentro de este conjunto de energías basadas en este medio podemos mencionar la energía mareomotriz, la térmica oceánica, la de corrientes marinas, la osmótica y la undimotriz u olamotriz.

### 2.2.1. Energía mareomotriz

Este tipo de energía se denomina mareomotriz por el hecho de aprovechar el ascenso y descenso del nivel del mar producido por las mareas, debidas a la acción gravitatoria del Sol y la Luna sobre los fluidos terrestres, para generar energía.

Al seguir las mareas un ciclo periódico totalmente predecible, dado que conocemos perfectamente el comportamiento de los ciclos de marea, la energía mareomotriz es ventajosa ante otras de comportamiento más aleatorio. No obstante, la gran desventaja es el elevado coste económico y ambiental de instalar este tipo de dispositivos actualmente en relación a la cantidad de energía generada, lo cual resulta ser un impedimento para su desarrollo y explotación.

Por el momento, sólo se ha llevado a cabo en ciertos lugares del Atlántico (para las corrientes) y en Francia y Corea del Sur (para los embalses). Además, para alcanzar el mayor potencial debería ser situado en zonas cerradas donde haya mareas superiores a 5 o 6 metros, como bahías o ensenadas. Actualmente, esas condiciones sólo se dan en aproximadamente 40 zonas en todo el mundo. Con la mejora de la eficiencia tecnológica, se permitirá la implantación de más centrales, puesto que su potencial se estima en 3,7 TW/año y 15 GW aprovechables.

Para la explotación de este tipo de energía existen dos métodos distintos de generación de energía:

- **Generador de corriente de marea:** aprovecha las corrientes generadas por las mareas. Sus ventajas son la minoración del coste e impacto ambiental en comparación a otros métodos. Se muestra este tipo de tecnología en la figura 2. El método de funcionamiento es el mismo que el descrito en el apartado 2.2.3.

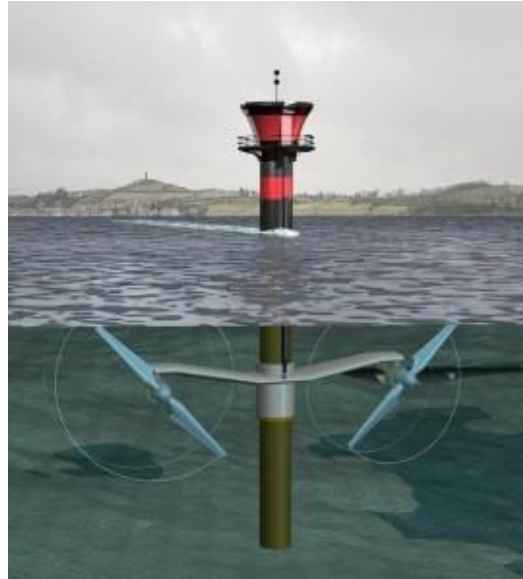


Figura 2. Generador mareomotriz de corrientes de marea [5]

- **Embalse de marea:** aprovecha la diferencia de potencial provocada por la pleamar y la bajamar. Para ello se debe proceder a la creación de un depósito que se llene con la pleamar y se vacíe con la bajamar. Aprovechando el desnivel, se hace pasar el agua retenida por una turbina para generar energía. El sistema es similar al que se emplea en la generación de energía hidroeléctrica y tiene un impacto ambiental alto, ya que hay instalarlos dentro de estuarios, por lo que en la actualidad su desarrollo está frenado y se prefiere potenciar las instalaciones para la extracción de energía de las corrientes de marea. Se muestra un ejemplo en la figura 3.

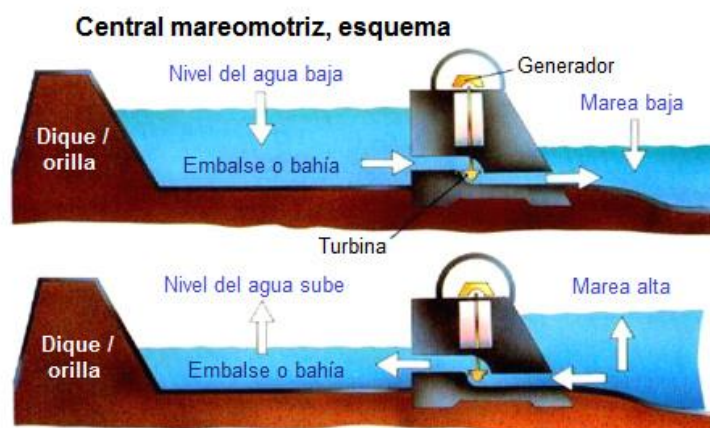


Figura 3. Embalse de marea [5]



Las instalaciones más importantes del mundo producen en torno a 4.400 GWh/año de media, con una potencia instalada de 250 MW aproximadamente. El coste del kWh resultó ser parecido al de una central eléctrica convencional.

### 2.2.2. Energía térmica oceánica

El diferencial de temperaturas entra la superficie del mar y el fondo del mismo puede llegar a los 20°C. Para aprovechar este gradiente térmico se pueden usar máquinas térmicas para la producción de energía. Técnicamente, se procede a construir tubos de 1 km de profundidad en zonas tropicales, como se muestra en la figura 4, ya que se pueden alcanzar potencias del orden de los 40.000 TW/año.

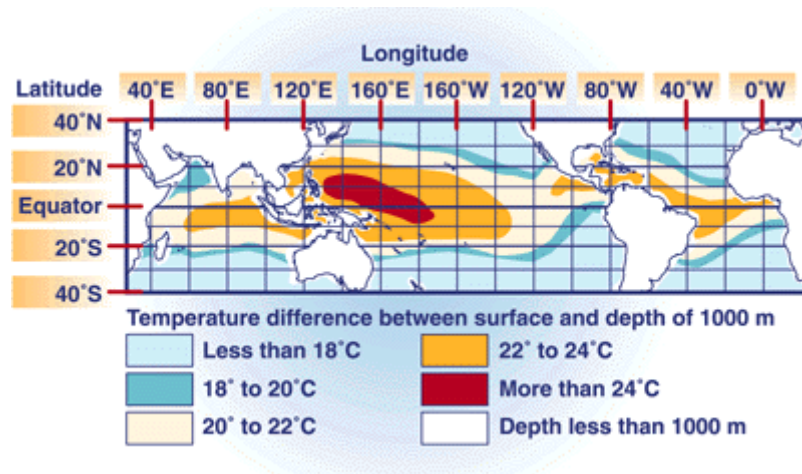


Figura 4. Mapa mundial de regiones con altos gradientes térmicos entre superficie y 1 km de profundidad.

Entre sus ventajas, cabe destacar que el gradiente térmico es predecible a la par que constante y que no es necesaria tecnología altamente avanzada para aprovechar esta fuente de energía. Por otro lado, el hecho de que se encuentre a gran profundidad hace que la operatividad con este tipo de recurso sea costosa y su situación espacial está alejada de las zonas de consumo.

### 2.2.3. Energía de las corrientes

Al igual que las mareas, las corrientes, son muy predecibles y contienen energía cinética haciendo de éstas altamente aprovechables. Mayoritariamente (además de las corrientes de marea ya mencionadas), los diversos tipos de corriente son causadas por la fuerza gravitatoria de astros como el sol y la luna, la diferencia de salinidad y temperatura en el agua y debidas al efecto de Coriolis por la rotación de la Tierra. Una gran ventaja, junto con su predictibilidad, es que no tienen un impacto ambiental significativo.

La potencia de este tipo de recurso a nivel mundial ha sido estimada entre 5 y 8 TW/año, aprovechándose sólo 30 GW en total. La operatividad con esta fuente de energía está entre los 20 y 30 metros de profundidad, viéndose resguardadas de las tormentas, y la eficiencia de las estaciones ronda entre el 40 y 60%. Una de las grandes ventajas de trabajar con el agua es el hecho de que la densidad de este fluido es 1000 veces mayor que la del aire, haciendo posible que a velocidades de 2 a 3 m/s se obtengan rendimientos similares que con velocidades de 11 a 12 m/s en el aire.

Sin tener en cuenta las corrientes de marea y considerando sólo las corrientes oceánicas, hay pocos lugares en todo el mundo donde se pueda aplicar este tipo de energía renovable, ya que en lugares de alto tránsito náutico se hace difícil la integración de estaciones. Lugares como el mar del Norte entre Reino Unido y Dinamarca, la India, Japón, el mar de Barents, el mar de Kara al norte de Rusia e incluso el mar Mediterráneo son propicios para la instauración de estaciones, según apunta la figura 5 donde se ven las zonas idóneas para la explotación de todas las energías marítimas.

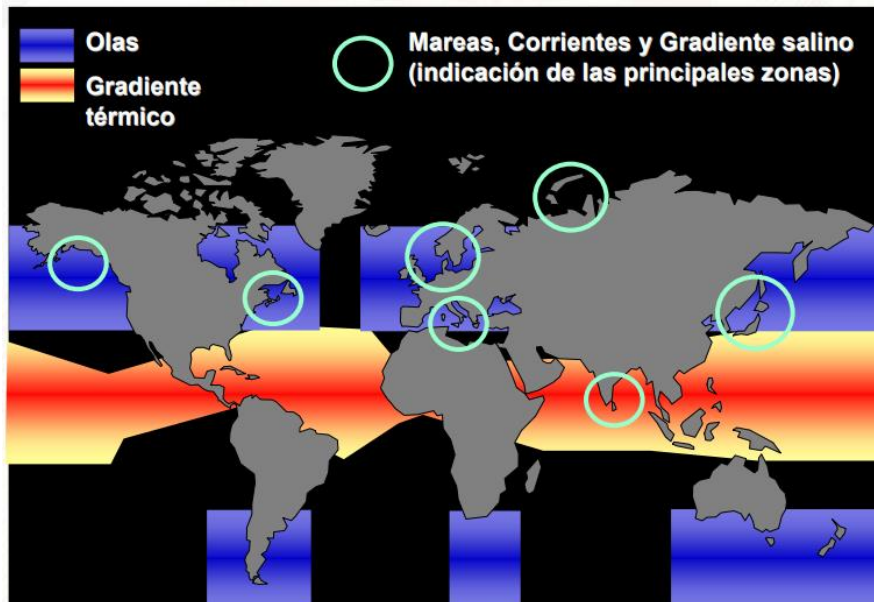


Figura 5. Distribución de las energías basadas en el mar a nivel mundial [6]

Entre los dispositivos ideados para la extracción de la energía cinética de las corrientes figuran los siguientes:

- **Rotores de eje horizontal:** extraen la energía del movimiento del agua de la misma forma que un aerogenerador lo extrae del aire en movimiento. La corriente de marea provoca que los rotores giren alrededor del eje horizontal para la generación de energía, tal y como ilustra la figura 6.

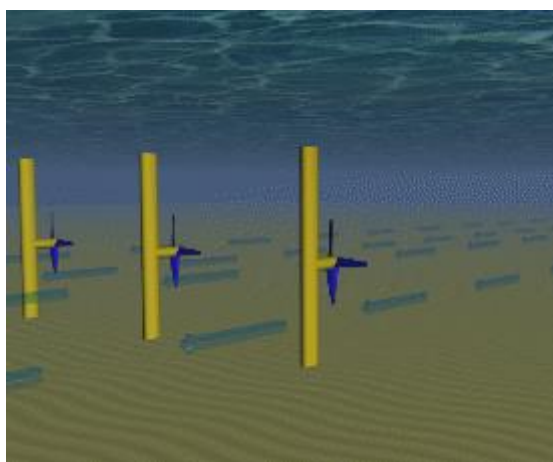


Figura 6. Rotores de eje horizontal [7]

- **Rotores de eje vertical:** extraen la energía de las corrientes de forma similar a las de rotores de eje horizontal, pero con un eje vertical. La corriente de marea provoca que los rotores giren alrededor del eje vertical para la generación de energía. Se muestra un ejemplo en la figura 7.

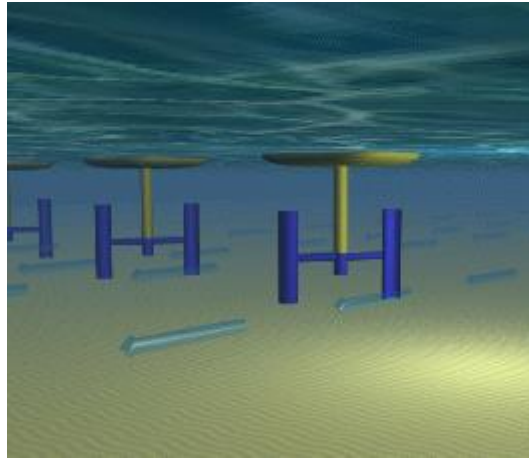


Figura 7. Rotores de eje vertical [7]

- **Hidroala oscilatoria:** se basa en unos alerones unidos al brazo oscilatorio, de esta manera la corriente de marea que fluye a ambos lados del ala provoca su ascenso y descenso. Este movimiento provoca la impulsión del fluido en el sistema hidráulico generando así electricidad. La figura 8 ejemplifica dicho dispositivo.

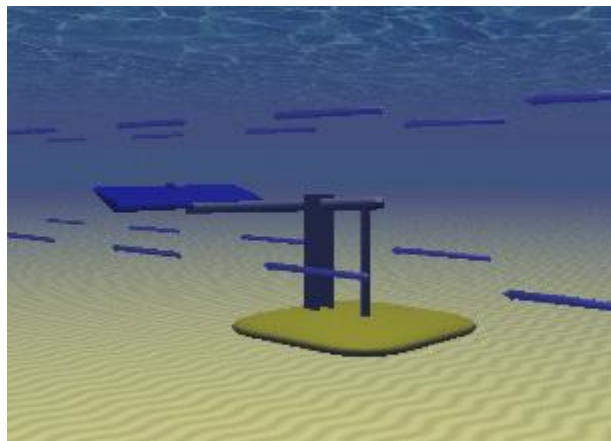


Figura 8. Hidroala oscilatoria [7]

- **Tubo de Venturi:** Los dispositivos de efecto Venturi alojan el dispositivo en la parte central de un conducto que concentra el flujo que pasa a través de la turbina. El dispositivo de recogida tipo embudo se halla sumergido de forma paralela a la corriente. El flujo de agua puede activar una turbina directamente o el diferencial de presión inducido en el sistema puede hacer funcionar una turbina de aire. Se puede apreciar la apariencia y funcionamiento de este dispositivo mediante la figura 9.

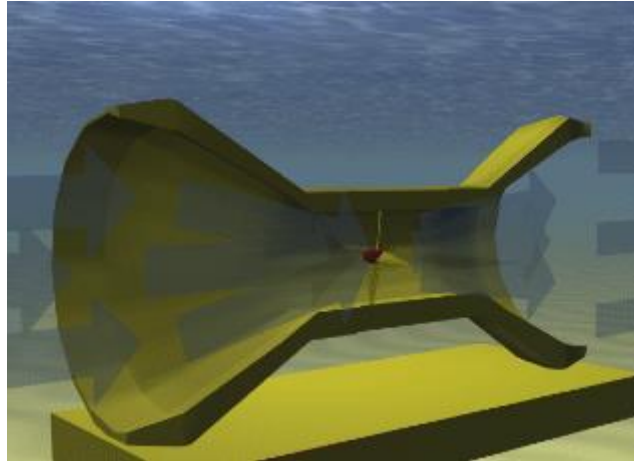


Figura 9. Tubo de Venturi [7]

- **Tornillo de Arquímedes:** se basa en un dispositivo helicoidal con forma de sacacorchos. Éste extrae energía de la corriente de marea cuando el agua se mueve hacia arriba o a través de la espiral de giro de las turbinas. El dispositivo se ve ilustrado en la figura 10.

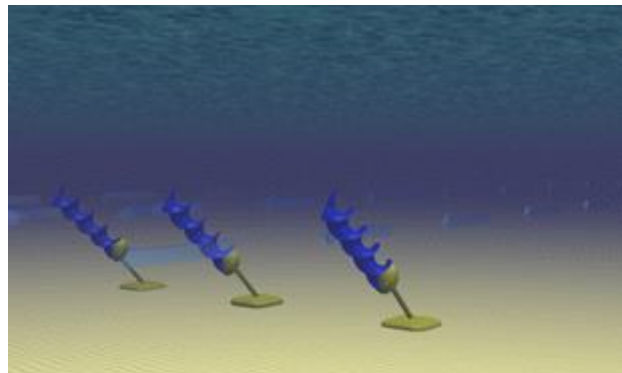


Figura 10. Tornillo de Arquímedes [7]

- **Cometa de corriente:** un dispositivo de este tipo está atado al lecho marino y lleva una turbina debajo del ala. La cometa 'vuela' en la corriente, describiendo una trayectoria en forma de ocho para aumentar la velocidad del agua que fluye a través de la turbina. Mediante la figura 11 se ve el funcionamiento de éste.

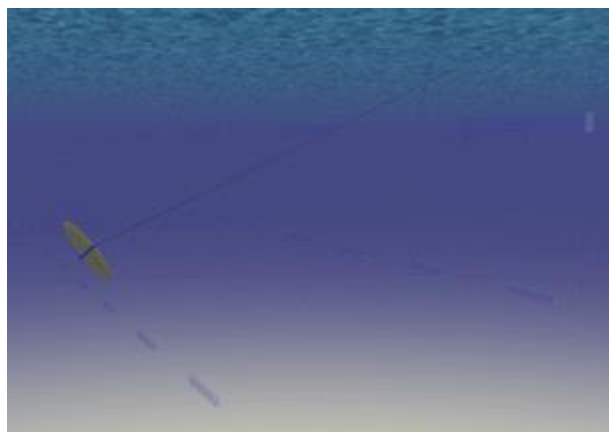


Figura 11. Cometa de corriente [7]

### 2.2.4. Energía osmótica o energía azul

Esta variante de energía marina es aprovechable principalmente en las desembocaduras de los ríos, cuando el agua dulce fluye hacia los mares y océanos. Aquí es donde se genera la ósmosis, un fenómeno físico-químico que se produce en las células de los seres vivos y en la que una membrana semipermeable permite pasar solo determinadas sustancias.

Una planta de energía osmótica pretende copiar a la naturaleza utilizando una membrana artificial que separa dos cámaras, una con agua dulce y otra con agua salada. El agua dulce es capaz de atravesar la membrana incrementando el volumen en el depósito de agua salada. Este hecho produce un importante aumento de presión equivalente a un salto de agua de unos 120 metros. Con esta potencia es posible mover una turbina y generar electricidad, tal y como ejemplifica la figura 12. Las ventajas de la energía azul son que no emite CO<sub>2</sub> a la atmósfera, y al contrario que otras energías como la solar o la eólica, produce electricidad de forma continua y predecible al no depender de las condiciones climatológicas.

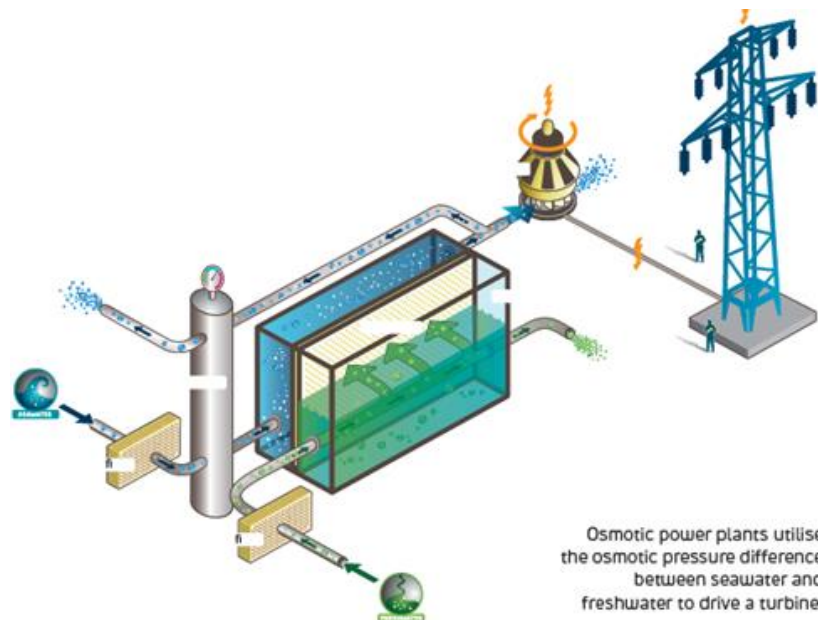


Figura 12. Esquema de un depósito de energía osmótica [8]

La energía azul presenta un gran potencial, sobre todo en lugares con ríos caudalosos. Los noruegos y los holandeses son muy conscientes de ello. La empresa noruega *Statkraft* puso en marcha en 2009 la primera planta prototipo de energía azul del mundo como se puede ver en la figura 13. Fue en un área industrial de Tofte, al sur de Oslo, y el objetivo era generar 10 kW de potencia. La planta alimentaba los tanques con 10 litros de agua dulce y 20 litros de agua salada por segundo, mientras varias tuberías filtraban bien los líquidos para no obstruir la membrana.



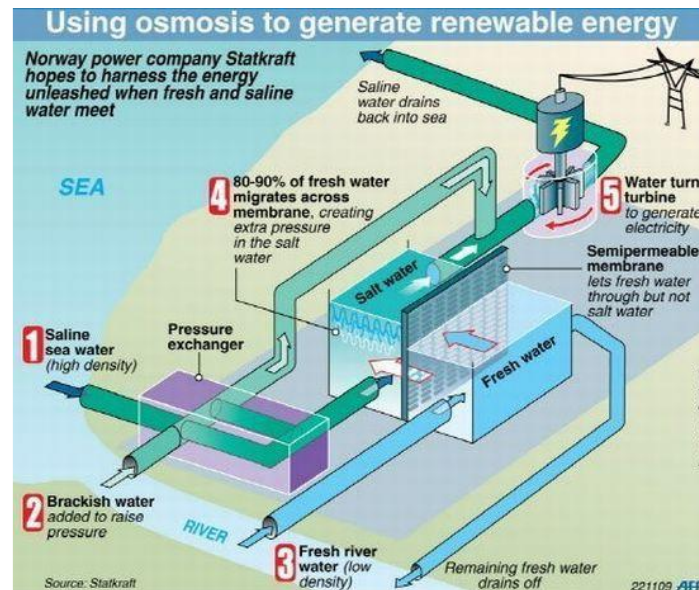


Figura 13. Primera planta prototipo de energía osmótica en Statkraft

Por su parte, la idea de los holandeses es crear una central eléctrica de salinidad en la desembocadura del río Rin y canalizar el agua del Mar del Norte y las del río para aprovechar su potencial. Los cálculos hablan de que el estuario podría generar una potencia de 1 GW, suficiente para abastecer de electricidad limpia a 650.000 hogares.

Con todo, el principal reto de la energía azul es el desarrollo de membranas permeables más eficientes y baratas que permitan que el ciclo natural de la ósmosis dé sus mejores frutos.

#### 2.2.5. Energía undimotriz

En este trabajo en particular, el sujeto de estudio es la energía undimotriz, que es la que se genera gracias al movimiento creado por la perturbación de la superficie marina: las olas.

Debido a que el oleaje es la consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, aun siendo muy a menudo irregular, su aprovechamiento para la obtención de energía es factible gracias a la instalación de distintas tecnologías que traducen la energía cinética y/o potencial causada por el vaivén de las olas a energía eléctrica. Estas tecnologías suelen ser denominadas Convertidores de Energía del Oleaje o, más comúnmente conocidos en inglés como *Wave Energy Converters (WECs)*.

Este tipo de energía tiene sus ventajas y sus desventajas [9] y, como todo tipo de recurso energético, habría que contemplar diversos aspectos a tener en cuenta antes de proyectar el aprovechamiento de esta fuente de energía.

En primer lugar, es una energía limpia puesto que el aprovechamiento de ésta no implica la emisión de gases nocivos de efecto invernadero. También es renovable y, al igual que la mayoría de fuentes de energía renovables, es inagotable.

Tiene un enorme potencial energético. Se estima que por cada metro lineal de cresta de ola se puede obtener entre 5 y 40 kW y, a medida que nos adentramos en el océano, se puede llegar a los 100 kW por metro de anchura de cresta.

Es considerada una fuente bastante segura, ya que son frecuentes y, en algunas zonas, raramente se interrumpen. Esto hace que sea una fuente de producción de energía bastante fiable, a diferencia de la energía solar y eólica, que dependen de la climatología en su mayor

parte. Hay que tener claro que la cantidad de energía varía de año en año o de estación en estación. Habrá meses del año donde se generará un mayor potencial energético y otros en que será inferior. Comúnmente, la energía de las olas y del viento tiene mayor potencia en invierno, lo cual hace que se complemente muy bien con la energía solar que tiene mayor potencial en verano.

Por último, es bastante eficiente respecto al espacio. Una granja de WECs con una superficie de menos de una milla cuadrada puede generar más de 30 MW, pudiendo abastecer las necesidades de aproximadamente 20.000 hogares.

Por otra parte, tiene efectos medioambientales, sobre todo cuando hablamos de las plantas cercanas a la orilla que son visibles desde tierra, ya que pueden ocasionar conflictos con intereses turísticos o con la aceptación de la población local debido a un impacto visual en el paisaje.

Los costes también son un punto importante a tener en cuenta. La energía de las olas está todavía en periodo de desarrollo, lo que significa que los costes son todavía muy altos. Encontrar los mejores lugares con olas, mejorar la conexión a la red eléctrica y la vida útil de las instalaciones son factores que afectan significativamente al precio de este tipo de energía.

No obstante, uno de los factores que hay que tener más en cuenta es el gran mantenimiento que requieren los sistemas de aprovechamiento. Casi todas las partes involucradas en las instalaciones para captar la energía de las olas necesita un mantenimiento regular. Esto redundará, de nuevo, en el aumento de los costes.

En general, el aprovechamiento de la energía undimotriz tiene un gran potencial. Sin embargo, sigue siendo necesaria una gran inversión en la investigación de mejores tecnologías para hacerla más competitiva.

### 2.3. WECs

Como se comentó con anterioridad, WEC es el acrónimo de *Wave Energy Converter* que se define, asimismo, como un dispositivo de conversión del recurso natural de las olas en energía. Al ser tecnología en fase de desarrollo, existe una variedad amplia de dispositivos con el fin de convertir en energía el movimiento del oleaje. Cada uno de ellos puede ser apropiado, en función de sus características y dependiendo de las circunstancias.

Generalmente, se podría decir que entre todos los tipos de WECs que hay se podrían distinguir tres criterios principales para dividir los dispositivos: en función de la ubicación, de cómo captan las olas y el tamaño y orientación.

Existen muchas otras formas de clasificar los dispositivos WEC: en función de la posición dentro del agua, según su aprovechamiento de energía, por su forma, dependiendo del uso final de la energía generada, y muchos más.

A día de hoy, hay más de mil patentes de WECs en todo el mundo. Este número se sigue incrementando actualmente, pero dependen del empuje de sectores de I+D para su comercialización.

#### 2.3.1. Ubicación

En función de la ubicación relativa a la costa existen tres generaciones, en las cuales hay varias localizaciones de los WEC. Se pueden apreciar las distintas generaciones energéticas en la figura

14, donde se pueden distinguir: la primera generación u *Onshore*, la segunda o *Nearshore* y la tercera u *Offshore*. También existe la posibilidad de tener generación mixta.

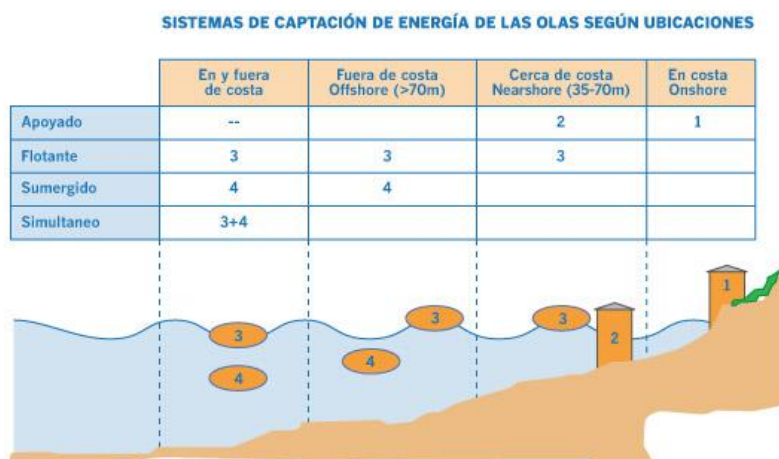


Figura 14. Clasificación de dispositivos de captación del oleaje en función de la posición relativa a la costa [10]

## 2.3.2. Tipo de captación

### 2.3.2.1. Diferencia de presión

- **Oscilador de columna de agua u *Ocillating Water Column (OWC)*** [11]–[13]: está compuesto por una cámara con una abertura trasera al mar por debajo del nivel de la superficie libre. Cuando las olas se aproximan al dispositivo, el agua es canalizada hacia la cámara aplicando presión al aire contenido dentro de ésta. Este aire escapa hacia la atmósfera a través de una turbina. Cuando el agua se retira, el aire vuelve a pasar a través de la turbina hacia el interior de la cámara. La figura 15 ejemplifica cómo funciona este tipo de dispositivo.

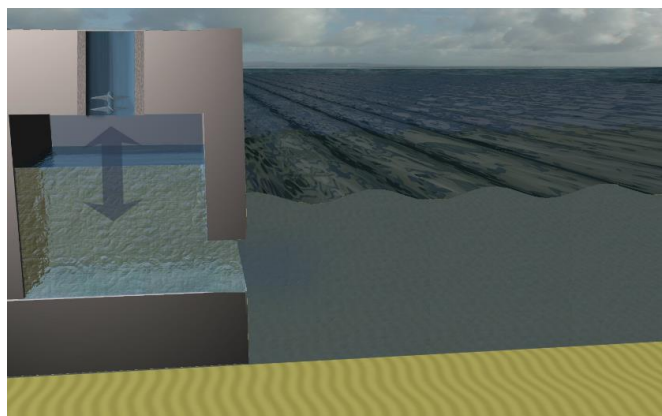


Figura 15. Oscilador de columna de agua (OWC) [14]

- **Efecto Arquímedes:** El dispositivo sumergido de diferencial de presión es un absorbedor de energía sumergido que aprovecha la diferencia de presión sobre el dispositivo entre las crestas y los senos de la ola. Contempla dos partes principales: una cámara cilíndrica rellena de aire fijada al lecho marino con un cilindro superior móvil. Cuando una cresta de ola pasa sobre el dispositivo, la presión por columna de agua comprime el aire dentro del cilindro, moviendo de esta forma el cilindro superior hacia abajo. Cuando el seno pasa por encima, la presión por columna de agua se reduce y el cilindro superior sube, tal y como se puede ver en la figura 16.



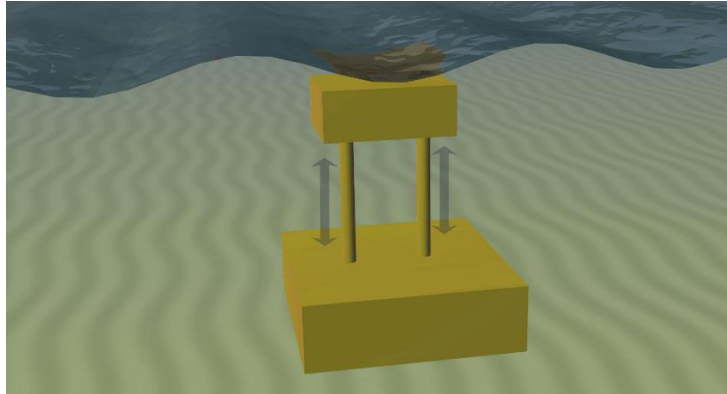


Figura 16. Dispositivo sumergido de diferencial de presión [14]

Una ventaja de este dispositivo es que, como está sumergido, no está expuesto a posibles golpes fuertes de ola como los sistemas de flotación [12], [13], y reduce el impacto visual. El mantenimiento seguramente es un posible hándicap al estar sumergido. Un ejemplo de este dispositivo es el *Archimedes Waveswing* [15] ilustrado mediante la figura 17.



Figura 17. Sumergido de diferencial de presión: *Achimedes Waveswing* [12]

#### 2.3.2.2. Cuerpos flotantes

Los cuerpos flotantes son característicos por su movimiento oscilatorio que puede ser de carácter horizontal, vertical, de cabeceo o, incluso, una combinación de ellos. El gran ejemplo de los dispositivos de flotación es el *Pelamis*, el cual se detallará en el siguiente apartado 2.3.1, ya que será uno de los utilizados en el estudio en Madagascar. La siguiente figura muestra un esquema de cómo funciona.

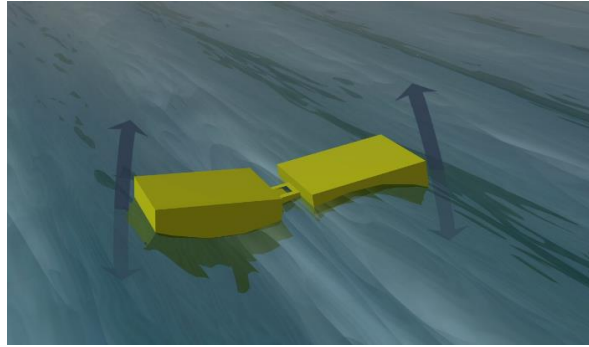


Figura 18. Dispositivo de flotación [14]

#### 2.3.2.3. Sistemas de rebase e/o impacto

Los sistemas de rebase se fundamentan en la interceptación de oleaje para generar una incidencia forzando de esta manera a que la ola sobrepase la estructura, aumentando así su energía potencial, cinética o, incluso, ambas. El ejemplo principal de dicho dispositivo es el *Wave Dragon* [12], [13], [16]. Éste también será utilizado para el estudio y viene más detallado en el apartado 2.3.2. En la figura 19 se muestra un esquema de su funcionamiento.

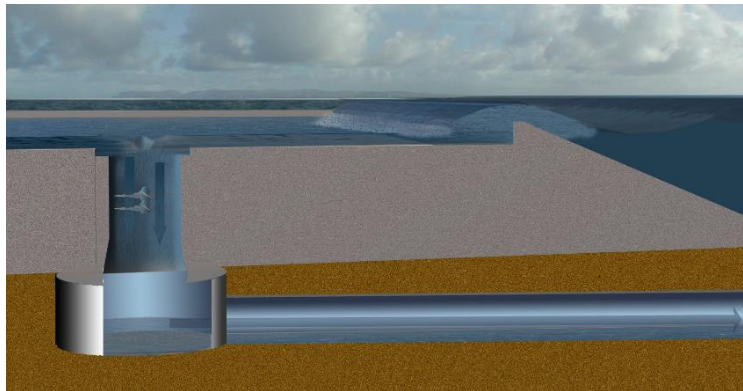


Figura 19. Dispositivo de rebase [14]

Por otro lado, los dispositivos basados en sistemas de impacto, o convertidores de presión por oscilación, suelen ser estructuras articuladas situadas cerca de la costa para la interceptación del oleaje. Este tipo de convertor está, generalmente, compuesto de un deflector con bisagras, perpendicular a la dirección del oleaje, que mueve de forma pendular su pala explotando el movimiento horizontal de las partículas impulsadas por el oleaje. Su funcionamiento quedaría ilustrado por la figura 20.

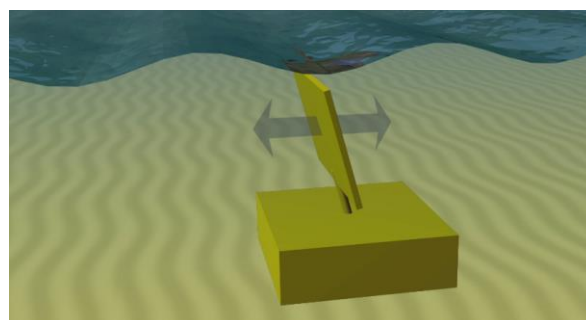


Figura 20. Dispositivo de impacto [14]

Un ejemplo es el *Aquamarine Power Oyster* [12], [17], un dispositivo que se instala cerca de la costa donde la parte superior del deflector (o pala) está por encima del agua en superficie. En la figura 21 podemos ver una imagen del *Aquamarine Power Oyster*.



Figura 21. *Aquamarine Power Oyster* [12]

### 2.3.3. Tamaño y orientación

Generalmente, hay tres clases importantes en función de su tamaño y orientación: los absorbedores, los atenuadores y los terminadores. Podemos ver en la figura 22 un breve resumen de cómo se clasifican en función de los parámetros expuestos.

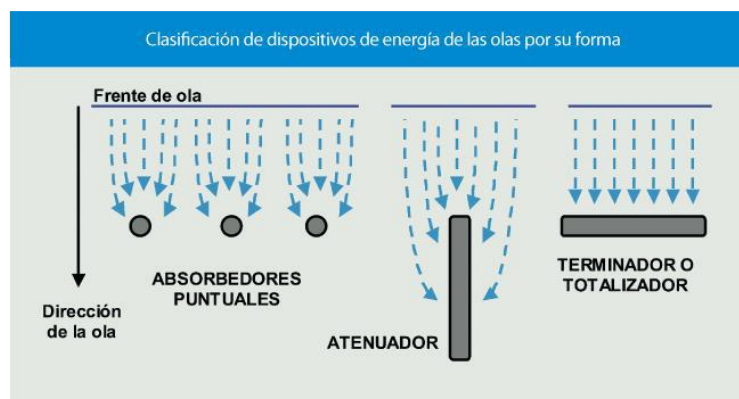


Figura 22. *Sistemas de aprovechamiento de la energía del oleaje según tamaño y orientación* [18]

#### 2.3.3.1. Absorbedor

Un absorbedor de energía es un dispositivo que posee unas dimensiones pequeñas en relación al tamaño de las olas. Pueden ser estructuras flotantes que cabecean de arriba a abajo sobre la superficie del agua o sumergidos bajo la superficie de ésta [12], [13], aprovechando el diferencial de presión. Hay numerosos ejemplos de absorbedores de energía, uno de los cuales es el *Ocean Power Technologies' PowerBuoy* [19]. La figura 23 muestra el concepto granja de este tipo de WEC.



Figura 23. Absorbedor de Energía: OPT PowerBuoy [12]

#### 2.3.3.2. Terminador o Totalizador

Los dispositivos terminadores tienen su eje principal paralelo al frente de oleaje y, por tanto, perpendicular a la dirección predominante de oleaje, y físicamente intercepta las olas. Un ejemplo de este tipo de dispositivo WEC es el *Salter's Duck*, desarrollado por la Universidad de Edimburgo, que se muestra en la figura 24.

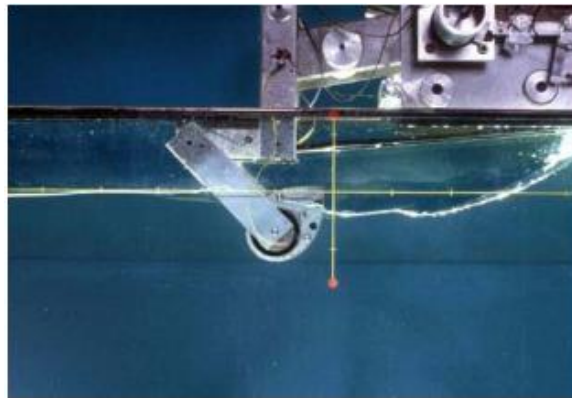


Figura 24. Dispositivo Terminador: Salter's Duck [12]

#### 2.3.3.3. Atenuador

Los atenuadores se tienden en paralelo a la dirección predominante del oleaje y cabalgan las olas. Un ejemplo de atenuador WEC es, de nuevo, el *Pelamis*, desarrollado por la ya no existente *Pelamis Wave Power* [12], [20] (anteriormente *Ocean Power Delivery Ltd*). Podemos observar un ejemplo de granja de dispositivos *Pelamis* en la figura 25.



Figura 25. Pelamis [12]

### 2.3.1. Pelamis

Este estudio comprobará cuán factible es el aprovechamiento de la energía undimotriz en el litoral de Madagascar comparando los resultados teóricos que se obtendrían con dos tipos de WEC, siendo el *Pelamis* uno de ellos. Este dispositivo fue lanzado por *Power Wave Pelamis (PWP)*, pero a día de hoy la empresa ya no existe y los prototipos de este dispositivo son propiedad del *European Marine Energy Centre (EMEC)*, que actualmente busca financiación para continuar su desarrollo. Su nombre procede de su forma y movimiento serpentino.

El primer modelo, cuyo nombre era *Pelamis P1*, a escala real que se instaló y se probó tuvo lugar en el EMEC, en 2004. Posteriormente, en 2008, en la costa portuguesa de Aguçadoura, se puso en marcha la primera granja de dispositivos de aprovechamiento energético *Pelamis*. Actualmente, hay seis aparatos activos, dos de los cuales son prototipos del nuevo modelo *Pelamis P2*, que se puede observar en la figura 26. Se trata de un dispositivo de tipo cuerpo flotante.



Figura 26. Modelo Pelamis P2 [20]

Los *Pelamis* suelen instalarse en zonas de aguas profundas, de 2 a 10 km de distancia de la costa y con profundidades superiores a 50 m. La potencia que alcanza es suficiente para suministrar eléctricamente 500 viviendas por año, unos 750 kW como máximo. En función de la zona de operación su rendimiento ronda entre el 15 y 40%.

Como se observa en la figura 26, se trata de una estructura articulada parcialmente sumergida compuesta por varios módulos cilíndricos unidos mediante juntas con bisagras. El P1 tiene una longitud total de 150 m, con un diámetro de 3,5 m y un peso de 700 T. Está compuesto por cuatro módulos. El P2, más grande y pesado, tiene una longitud de 180 m entre los cinco módulos, un diámetro de 4 m y un peso de 1350 T.

El principio de funcionamiento del Pelamis se fundamenta en la activación de dos grupos que contienen dos cilindros hidráulicos cada uno, ubicados en las articulaciones entre los módulos, que aprovechan el movimiento local en vertical y horizontal inducido por las olas que hace rotar los ejes de giro, tal y como muestra la figura 27. Las oscilaciones mecánicas son transformadas a energía eléctrica mediante un Módulo de Conversión de Energía (PCM, Power Conversion Module), que bombea líquido de un depósito de baja presión a uno de alta presión. Al mismo tiempo, un generador hidráulico transporta líquido de uno de los depósitos a otro generando, de esta manera, electricidad. Esta energía eléctrica es enviada desde cada módulo al principal y desde ahí a un cable que recorre el fondo del mar o previamente a un punto común, en el caso de que haya varios dispositivos, y de ahí a tierra.



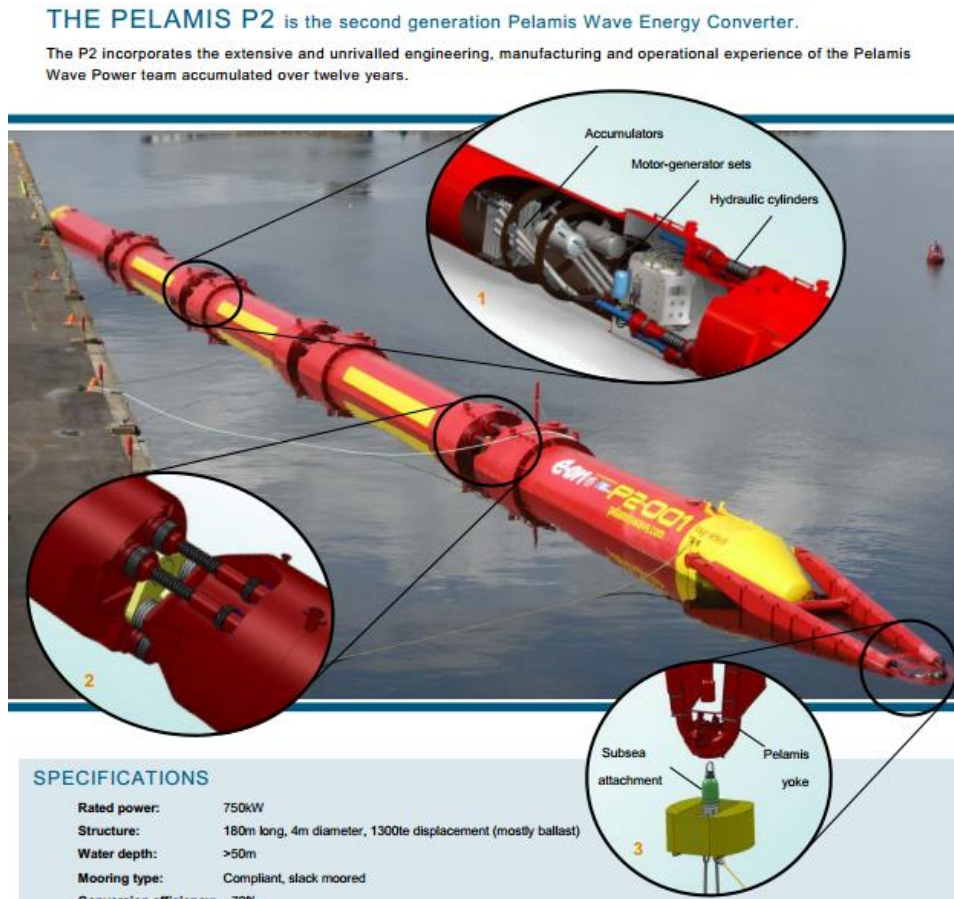


Figura 27. Esquema de funcionamiento del Pelamis.

El *Pelamis* es, de los WECs vistos, el más desarrollado. Es tal el nivel de desarrollo, que ya está en fase comercial debido a la cantidad de ventajas con las que cuenta. A continuación, se muestra un listado de algunas de ellas:

- Genera electricidad eficiente y constantemente gracias a acumuladores de alta presión, aunque reciba un oleaje cambiante.
- Su funcionamiento se sitúa en el principio de la línea de absorción, al contrario que una boya que actúa puntualmente, lo que le permite triplicar su potencia al recorrer la ola toda la longitud del dispositivo.
- Cuenta con un sistema de recopilación de datos para desarrollar estrategias más eficientes y flexibles de cara a mejoras y a futuros modelos.
- Su impacto visual y medioambiental es bajo. Solamente precisa de dos puntos de anclaje y el fluido del circuito hidráulico es biodegradable y no es tóxico para el ecosistema marino.
- Su mantenimiento es más sencillo gracias a que se puede traer el dispositivo al taller y no al revés.
- Puede operar a gran variedad de profundidades.
- Cuenta con limitadores de potencia para cuando los rangos de entrada de energía sean muy superiores a los de la operatividad habitual. El dispositivo penetra las olas de demasiada potencia como haría un pato o un surfista. Esto le permite funcionar normal y constantemente cuando hay temporales extremos y alargar su durabilidad y resistencia.
- Se pueden controlar las juntas para que el mecanismo entre en resonancia forzosamente, activándolo cuando sea requerido y evitándolo en condiciones extremas.

- El rendimiento de generación eléctrica es ligeramente superior al 80%, lo que supone unas pérdidas de menos del 20% de potencia total. Los mayores rendimientos se dan cuando la potencia incidente es baja.

### 2.3.2. Wave Dragon

El otro convertidor de energía del oleaje (WEC) con el que se trabaja en este estudio es el Wave Dragon. Su nacimiento fue gracias al programa de energía marítima danesa, del cual obtuvo un fondo de 6 millones de euros. Su nombre proviene de un malentendido lingüístico, ya que un compañero del propietario de la compañía que lo inventó le dio el nombre de cometa por su semejanza a éste, pero en danés se utiliza la misma palabra para denominar al dragón.

El primer prototipo, ilustrado por la figura 28, en fase de pruebas se instaló en la zona de Nissum Bredning, Dinamarca. No está en fase comercial, ya que se sigue trabajando en optimizar los prototipos.



Figura 28. Prototipo de Wave Dragon [16]

El Wave Dragon está basado en el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas. La primera parte del proceso es el rebase y almacenamiento, para el cual unos brazos de 145 m reflejan las olas abarcando una zona de 300 m de ancho en forma de cono, así la concentración de oleaje es superior. Después, las olas ascienden por una rampa de forma elíptica ligeramente corta e inclinada. Este dispositivo tiene esta forma, comprobada y optimizada con los modelos de prueba, debido a que incrementa considerablemente el rebase del agua. La segunda parte del proceso canaliza el agua recogida hacia unos grandes depósitos y la hace circular por unas turbinas Kaplan para aprovechar la energía potencial que se ha conseguido para la generación de electricidad, tal y como muestra la figura 29.

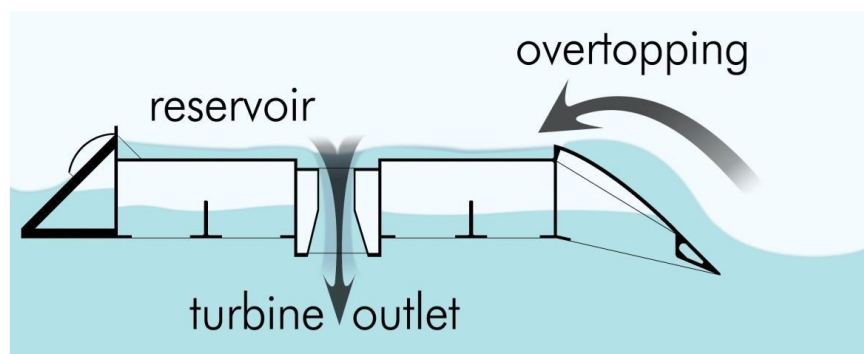


Figura 29. Principio de funcionamiento de Wave Dragon [12]

Además, el dispositivo cuenta con unas cámaras de aire presurizadas para mantener una línea de flotación óptima en función del tipo de oleaje incidente. Cuenta, además, con un sistema de navegación para posicionarse en la orientación adecuada en función de la dirección del oleaje.

Existen tres modelos, aparte del prototipo instalado en Dinamarca, de Wave Dragon de distinto tamaño, cada uno diseñado para abarcar un determinado potencial de oleaje dependiendo de la zona de operación. El modelo más pequeño trabaja con olas con una potencia de 24 kW/m, el de dimensiones medias con olas de 36 kW/m y el más grande con olas de 48 kW/m (ver tabla 1). El modelo con el que se ha trabajado en este estudio es el que recibe olas de 36 kW/m, ya que la zona de estudio no presenta un clima de oleaje extremo, pero tampoco calmado. La potencia total valorada para este dispositivo es de 7 MW.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los distintos modelos de Wave Dragon [16]

Modelo de Wave Dragon	Tamaño			
	Prototipo	Pequeño	Mediano	Grande
Trabajabilidad	0,4 kW/m	24 kW/m	36 kW/m	48 kW/m
Peso	237 T	22.000 T	33.000 T	54.000 T
Dimensiones	58x33 m	260x150 m	300x170 m	390x220 m
Longitud brazos	28 m	126 m	145 m	190 m
Altura	3,6 m	16 m	17,5 m	19 m
Volumen depósito	55 m <sup>3</sup>	5.000 m <sup>3</sup>	8.000 m <sup>3</sup>	14.000 m <sup>3</sup>
Núm. Turbinas	7	16	16-20	16-24
Generadores	7 x 2,3 kW	16 x 250 kW	16-20 x 350-440 kW	16-24 x 460-700 kW
Potencia	20 kW	4 MW	7 MW	11 MW
Producción anual	-	12 GWh	20 GWh	35 GWh
Profundidad	6 m	>20 m	>25 m	>30 m

La construcción del dispositivo es sencilla y resistente, ya que no cuenta con partes móviles, al igual que podrían ser mecanismos neumáticos, sin tener en cuenta las turbinas. Esto supone una ventaja, ya que su resistencia a la climatología extrema es mayor, permitiendo así la operación *offshore*. Por otro lado, la complejidad radica en el modelado de datos para optimizar la forma de la rampa de ascensión de la ola para incrementar el rebase del agua. Su anclaje se realiza en aguas profundas, preferiblemente en zonas de más de 40 m de profundidad. De esta forma aprovecha la potencia del oleaje antes de que ésta se vea reducida al aproximarse a la costa, donde se producirían pérdidas de energía.

El precio de producción de este WEC varía dependiendo del modelo. Cuanto mayor es el tamaño de dispositivo, menor es el precio por unidad. En particular, para el modelo de 24 kW/m el precio es de 0,054 €/kWh, para el de 36 kW/m es de 0,040 €/kWh y para el de 48 kW/m es de 0,030 €/kWh. Esta cota de precios permitiría al Wave Dragon entrar en el mercado para competir al nivel de otras energías renovables, o como complemento de ellas. Para poder alcanzar una producción adecuada el número de dispositivos ideal para formar un parque de energía del oleaje se encontraría entre 10 y 200. Con únicamente 7 dispositivos en red, que ocuparían un área de 3,2 km<sup>2</sup>, se podría abastecer energéticamente entre 40.000 y 60.000 hogares con una potencia de entre 50 y 80 MW. La extensión de este parque equivaldría al 75% del espacio que requeriría un parque eólico de la misma potencia instalada. De la misma forma, el impacto visual sería casi nulo, a diferencia del que provoca un parque eólico.



### 3. Zona de estudio

La evaluación de la energía de oleaje se ha decidido llevar a cabo en una de las zonas menos estudiadas en el Océano Índico: Madagascar. Para ser precisos, se ha decidido estudiar el litoral sur y este de este país insular. Este país, considerado uno de los países insulares más grandes del mundo, está situado al sureste de África, frente a las costas de Mozambique. En su mayoría, la extensión del país se encuentra por encima del Trópico de Capricornio, aunque el sur de la isla está por debajo. Además, es la isla más grande del continente africano y la cuarta más grande del mundo, y está formada a su vez por un conjunto de archipiélagos. Está separada del continente por el canal de Mozambique, tal como puede verse en la figura 30.



Figura 30. Mapa donde se especifica la situación (en negro) de Madagascar, [www.mapa-satelite.com](http://www.mapa-satelite.com)

#### 3.1. Demografía

Madagascar tiene una extensión de unos 587.041 km<sup>2</sup> en la cual, según los últimos datos registrados hasta 2017 (ver figura 31), habita una población de 24.894.551 habitantes, lo que representa un aumento de casi 700.000 habitantes respecto a 2016. Por lo tanto, tiene una densidad a día de hoy de unos 43 habitantes por km<sup>2</sup>. Además, como se ve en la figura 32, el PIB es del orden de 10.000 millones de dólares. Esto supone que la renta per cápita se sitúa en 401,84 dólares (figura 33), según datos del Banco Mundial [21] obtenidos hasta el año 2016.

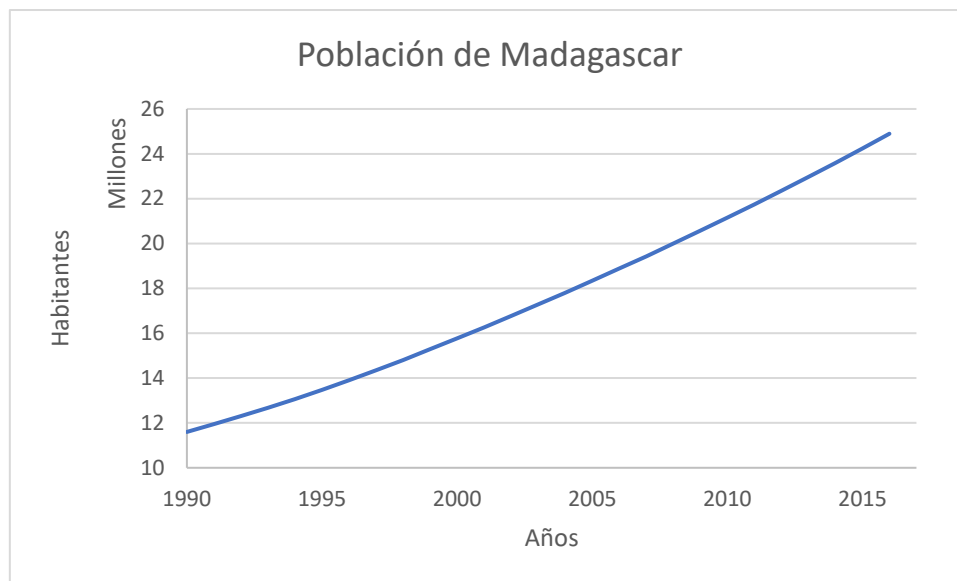


Figura 31. Población de Madagascar en los últimos 26 años.

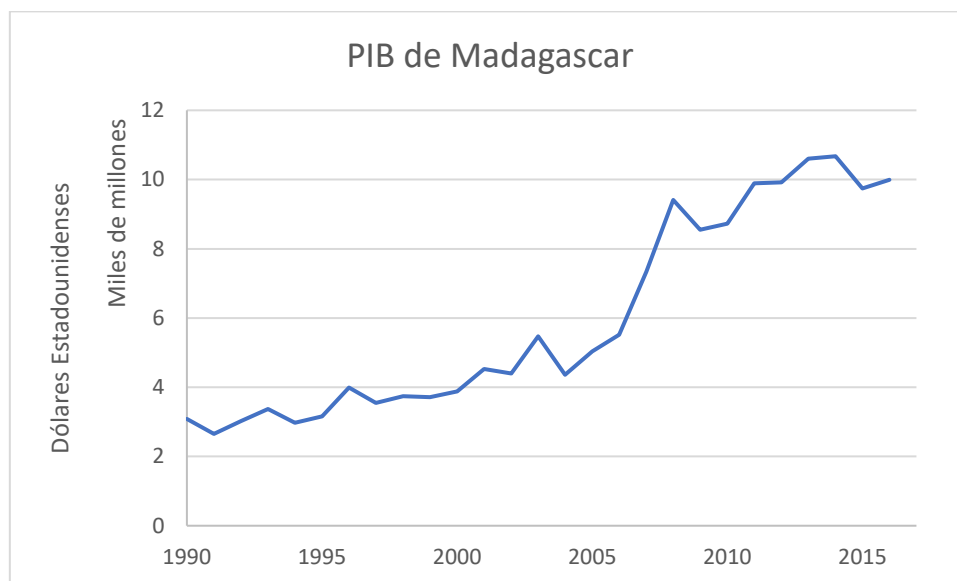


Figura 32. Producto Interior Bruto (PIB) de Madagascar en los últimos 26 años.

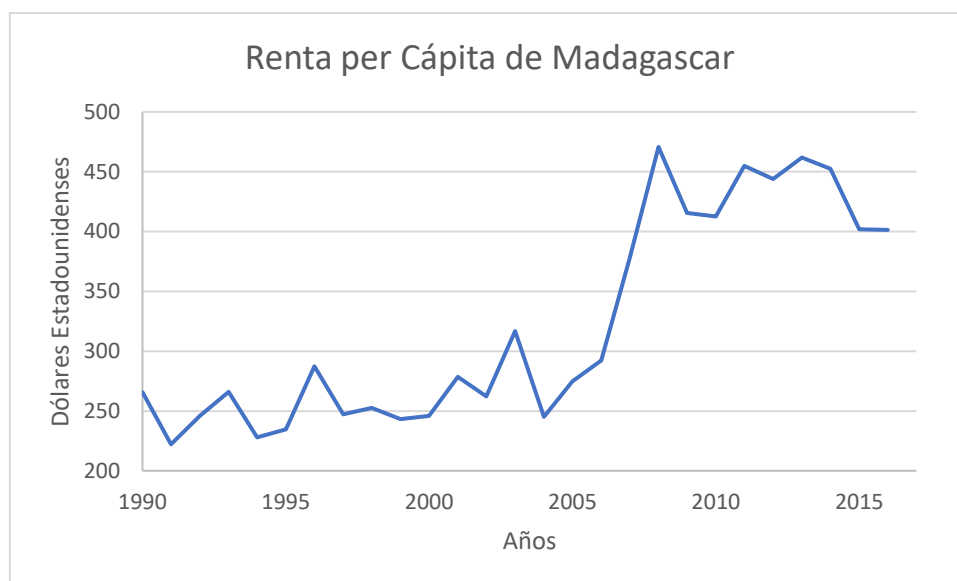


Figura 33. Renta per cápita de Madagascar en los últimos 26 años.

### 3.2. La energía en Madagascar

#### 3.2.1. Energías renovables más importantes en Madagascar

De todo lo que se ha comentado en el punto anterior, las energías que a día de hoy son efectivas y se están utilizando en el país insular son: la energía hidroeléctrica, la energía térmica derivada de los combustibles fósiles y la energía solar. Entre estos tres tipos de energía, la energía de carácter hidroeléctrico es la más abundante, seguida de la térmica convencional y la energía solar, la cual está recién instaurada. Se hace obvio este hecho al observar la figura 34 [22].

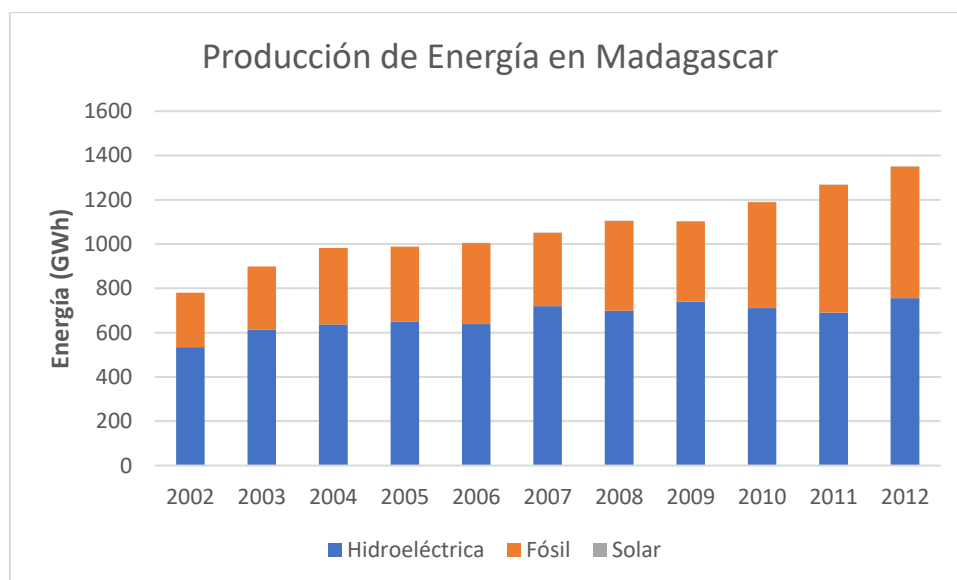


Figura 34. Producción de energía en Madagascar en función del tipo de energía, entre 2002 y 2012 [22]

La energía hidroeléctrica, siendo la más explotada por la República de Madagascar en su vasto territorio, representa un 62,96% de la producción total. Está seguida por la energía térmica convencional, cuyos combustibles fósiles son todos importados, que ostenta un segundo puesto con un 36,04% del total producido en el país. Por último, y menos desarrollado debido a la alta inversión inicial, aparece un 1% del total producido por la energía solar. La figura 35 muestra

cómo, hasta el año 2015, estaban distribuidos los tres sectores de producción eléctrica según datos de [23], [24]

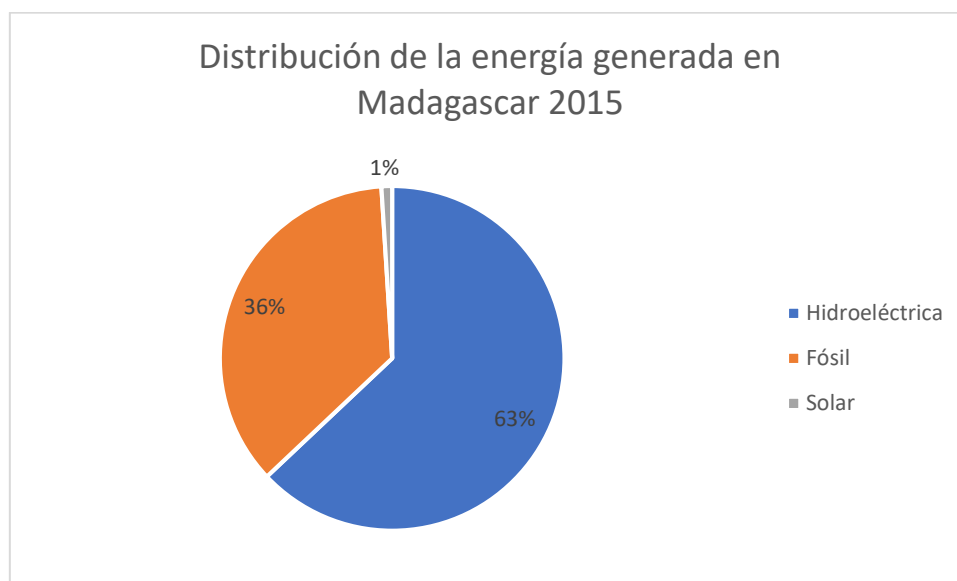


Figura 35. Distribución de la energía generada según su tipo en Madagascar en 2015 [23]

En definitiva, estas tres ramas de la energía son las que proveen de electricidad al país. Aunque unas tengan más importancia que otras, las tres son importantes a día de hoy para la sociedad malgache vista la evolución del consumo y del aumento poblacional. En la figura 36 podemos observar la evolución del consumo en el país desde 2002 hasta 2012 y, por consiguiente, cómo se ha desarrollado la producción para satisfacer la demanda según [22].

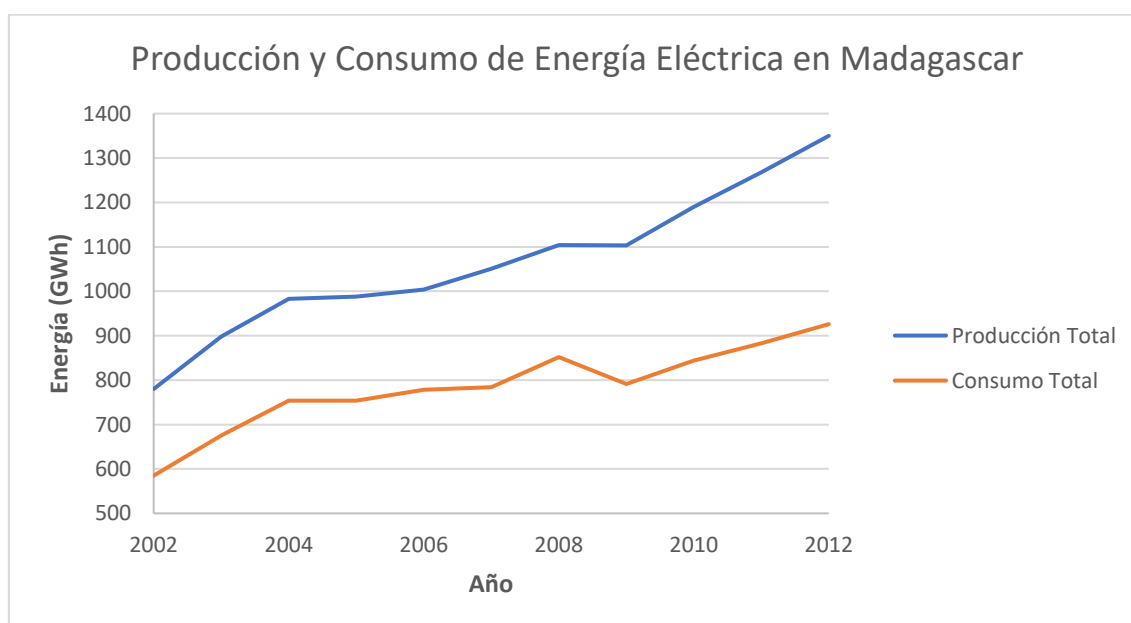


Figura 36. Consumo y la Generación total de energía eléctrica en Madagascar, entre 2002 y 2012 [22]

### 3.2.2. Estado de las infraestructuras energéticas en Madagascar

Como ya se ha visto previamente, las energías que actualmente están en funcionamiento en Madagascar son la energía hidroeléctrica, la térmica convencional y la solar. También se ha podido observar que la que tiene mayor papel en este proceso de producción es la de carácter hidroeléctrico con un 62,96% de toda la generación eléctrica, seguida de la térmica con un 36,04% y la solar con la pequeña aportación de un 1%.

Según datos expuestos recientemente por la *U.S. Agency for International Development* sobre el sector energético de Madagascar [25] el consumo per cápita, en el año 2015, de electricidad fue de 48,53 KWh. Teniendo en cuenta los datos expuesto en el apartado anterior sobre demografía, si la población del país insular alcanza el número de 24.894.551 habitantes estaríamos hablando de un total de 1208,13 GWh consumidos en todo el país. Viendo que el precio por KWh en el país es de unos 0,85 euros aproximadamente, estaríamos hablando un total de 1.027.910.500 euros anuales.

Aunque estos números parecen bastante altos, cabe resaltar que ese consumo es el más bajo de África y según [23], [25] sólo el 15% de la población del país tiene acceso a servicios eléctricos, lo cual quiere decir que del total generado sólo se cubre al 15% de la población y, en el caso de las zonas rurales, se estaría hablando de un 4%. Lo cual indica, significativamente, *a priori* que se debería invertir en mejorar las formas de energía renovable que ya se están trabajando y/o invertir en nuevas formas de energía renovable que puedan trabajar con las que ya hay en la isla, como es el caso de la energía del oleaje.

#### 3.2.2.1. Biomasa

Madagascar es el país que tiene la mayor cantidad de biomasa por hectárea, de unos 114 m<sup>2</sup>/ha, entre los países del sur de África. En 1990, alrededor del 18% de la superficie total del país estaba cubierta de bosques, lo que significaba 10.746.403 ha. Sin embargo, como se muestra en la figura 37, al cabo de una década, no había más de 9,294,237 ha. La disminución de la superficie forestal se debe principalmente a los incendios forestales y a la insostenible administración. El uso de la madera para la agricultura, la cocina y los materiales de construcción tiene un efecto significativo en el bosque.

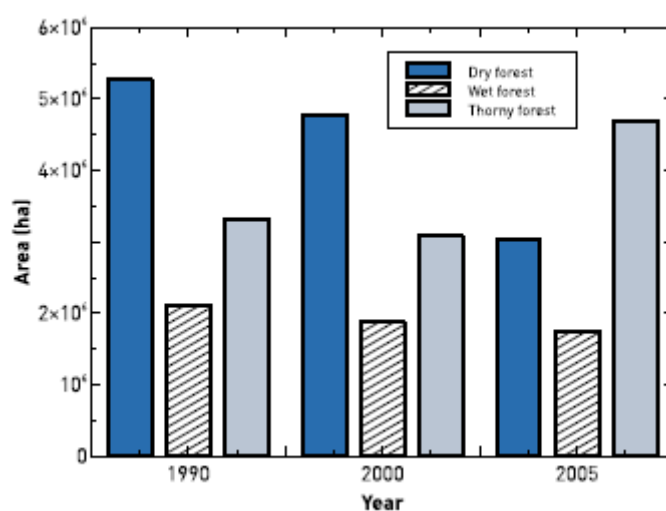


Figura 37. Área cubierta de bosque [22]

De acuerdo con la *USAID (United States Agency for International Development)* [24], el consumo de madera en Madagascar es de 21,7 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales un 41,8% proviene de la

fabricación de leña y el 39.7% de la fabricación de carbón. El 18,5% restante es de las industrias de transformación de la madera. La tabla 2 muestra la estimación del consumo anual medio de madera en Madagascar. Para la construcción, implementación y servicio de madera, la cantidad de troncos operados entre 1998 y 2002 fue de 418.042 m<sup>3</sup>. En promedio, sólo el 35% de estos registros son transformados en productos finales, ya que 65% son residuos compuestos por astillas, serrín y restos de madera.

Tabla 2. Consumo anual de madera [24]

Type of wood	Average (million m <sup>3</sup> )	Percent (%)
Firewood	9026	41.8
Charcoal	8575	39.7
Wood construction and service	4006	18.5
Total	21,607	100

Varios proyectos en Madagascar son financiados por la Unión Europea, como el proyecto GESFORCOM en relación con Níger y Malí. Estos proyectos se centraron en el desarrollo del acceso eléctrico rural eficiente para reducir la pobreza basada en el sector de la madera, la recuperación de residuos. La gestión de los residuos urbanos es un punto crucial para ciudades de Madagascar. Esta cuestión se refiere tanto a cuestiones de salud como de recuperación de energía. Por ejemplo, la comuna de Mahajanga tiene una producción de 30.000 toneladas de residuos orgánicos. Sólo el 30% está actualmente en el vertedero. En 2013 se instaló una central eléctrica en Mahajanga para tratar 12.000 toneladas de desechos orgánicos para hacer compost. El compostaje permite evitar hasta 150.000 toneladas de CO<sub>2</sub> en 10 años. Este modelo de gestión de residuos urbanos podría aplicarse a otras ciudades principales del país.

#### 3.2.2.2. Energía geotérmica

Cabe destacar que el ciclo de desarrollo de proyectos geotérmicos para la producción de energía se puede subdividir en ocho etapas sucesivas: levantamiento preliminar, exploración, perforación de prueba, revisión y planificación de proyectos, desarrollo de campo, construcción y puesta en marcha [26]. Aunque Madagascar aún no ha alcanzado etapas avanzadas en exploración de superficie, una evaluación preliminar de las temperaturas indica que la mayoría de los sitios tienen un potencial geotérmico relativamente bajo a medio. Se calcula que las temperaturas del depósito en profundidad se encuentran entre 75 y 152 °C y se calcularon utilizando un geotermómetro de calcedonia. Alguna de las temperaturas del yacimiento de estos sistemas magmáticos asociados parece prometedor y puede apoyar las plantas de energía geotérmica [22]. Por lo tanto, después de las prospecciones preliminares, Andrianaivo y Ramasiarinoro categorizaron tres zonas clave que presentan interesantes potenciales geotérmicos para la producción de energía en esta isla, a saber: la zona geotérmica norteña en el barrio de Ankaizina, la zona geotérmica de Itasy, y las partes centrales de la zona geotérmica de Antsirabe, como se muestran en la figura 38. Como una estimación tentativa del potencial geotérmico de esta isla volcánica, fue propuesto el valor de 350 MW.

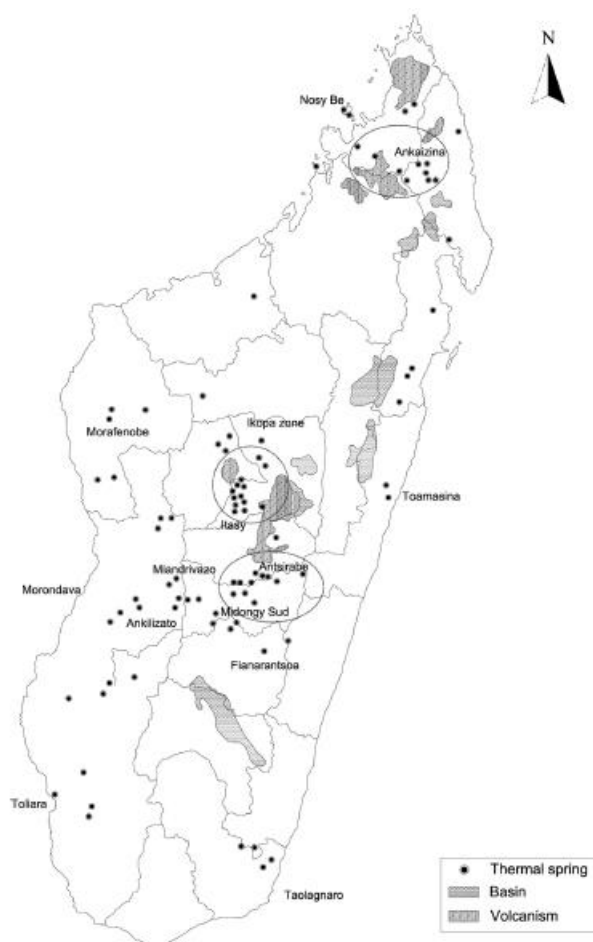


Figura 38. Ubicación de zonas potencialmente geotérmicas en Madagascar [22]

### 3.2.2.3. Energía hidroeléctrica

Con exactamente una superficie total de 587.041 km<sup>2</sup>, Madagascar tiene una red hidrográfica de más de 3000 km de ríos que representa un recurso de agua renovable de 337 km<sup>3</sup> al año, adecuado para la energía debido a la configuración del relieve. En 2002, Hydro-Quebec, una empresa canadiense, identificó alrededor de 7800 MW de potencial hidroeléctrico en Madagascar, y sólo el 2% de este potencial se explota. Según estudios [22] hay más de 100 hidroeléctricas potenciales con una capacidad de salida superior a 50 MW y más de 50 sitios potenciales para más de 1000 MW en Madagascar. La principal compañía, con más del 77% de cuota de mercado en la producción de electricidad en Madagascar, es la empresa de gestión pública de JIRAMA, que se basa en energía hidroeléctrica apoyada por centrales térmicas que utilizan motores Diesel para satisfacer las necesidades de electricidad de los usuarios. Por lo tanto, según la base de datos de JIRAMA, durante los últimos 15 años el promedio de generación de energía hidroeléctrica ha sido de 660 GWh/año, lo que representa el 64,8% del total de electricidad producida en Madagascar, con una potencia hidroeléctrica instalada total de 105 MW, mientras que algunas microempresas privadas para la electrificación rural tienen una capacidad instalada inferior a 0,5 MW. En la figura 39 se puede apreciar la situación de las actuales estaciones hidroeléctricas y, también, de las que están proyectadas o no definidas todavía.



#### 3.2.2.4. Energía solar

Debido a su ubicación, Madagascar tiene un alto potencial de energía solar. Como se muestra en la figura 40, la irradiación horizontal global es de 2000 kWh/m<sup>2</sup>. Casi todas las regiones tienen más de 2800 horas (350 días soleados) de radiación solar. En la costa oeste, la radiación solar oscila entre 4000 y 6500 kWh/m<sup>2</sup>, [22]. A pesar del potencial del recurso solar, el desarrollo de sistemas de energía solar sigue siendo difícil debido a la inversión inicial.

En Madagascar, recientemente se han desarrollado instalaciones de energía solar. Debido a su coste, los sistemas de calefacción solar no son realmente muy populares. Los sistemas fotovoltaicos representan menos del 1% de la generación mixta y sólo se ha integrado desde 2006. En marzo de 2016, Madagascar se unió al programa *Scaling Solar* del Grupo del Banco Mundial. En este programa se planean unos 30-40 MW de plantas solares para reducir el desprendimiento diario de carga e interrupciones de la distribución de electricidad. La energía solar se utiliza para desarrollar la electrificación rural y, gracias al acceso eléctrico en zonas rurales mediante sistemas fotovoltaicos, unos 20.000 habitantes tienen acceso a electricidad con la ayuda del proyecto BOREALE.



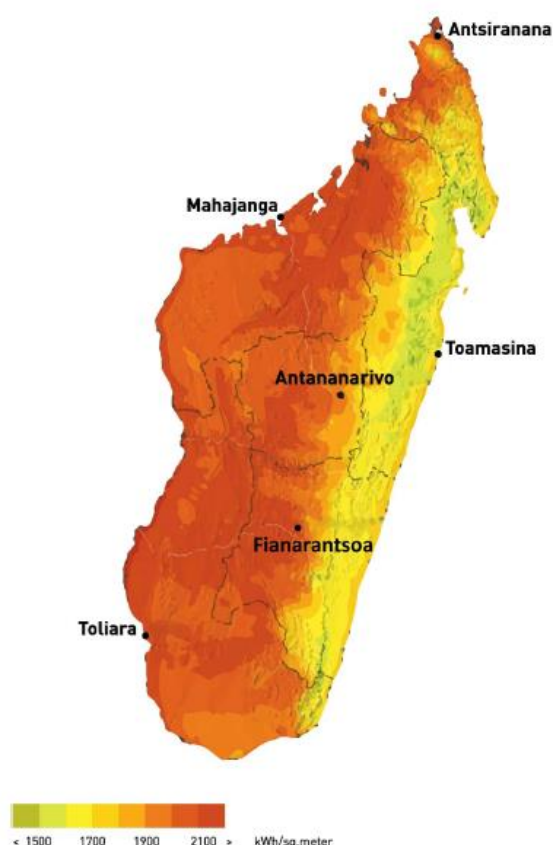


Figura 40. Irradiación horizontal global en Madagascar [22]

#### 3.2.2.5. Energía eólica

Madagascar tiene un importante potencial de energía eólica. De hecho, con cuatro tipos de vientos: los vientos costeros, el viento local, los vientos alisios y los ciclones, Madagascar puede alcanzar un potencial de energía eólica de unos 2000 MW. Con una variación estacional, el viento local y costero y los vientos alisios constituyen una fuente confiable de energía eólica. Este importante potencial eólico se encuentra principalmente en el norte, con una velocidad media superior a 8 m/s, en el sur con una velocidad media superior a 7,5 m/s y en la costa este de la isla con una velocidad media de 6,5 m/s. Sin embargo, los ciclones frecuentes (de uno a cinco) por esta parte del este del país, podrían ser un obstáculo para la energía eólica en desarrollo. Por lo tanto, el norte, el sur y la costa este de Madagascar son considerados como la parte más ventosa del país y, por eso, tienen un alto potencial para el desarrollo de este tipo de energía. Estos valores se confirman por el atlas de viento, que se presenta en la figura 41, suministrado por el ADER [27], y que muestra la distribución de la velocidad del viento según la elevación, 50 o 10 m.

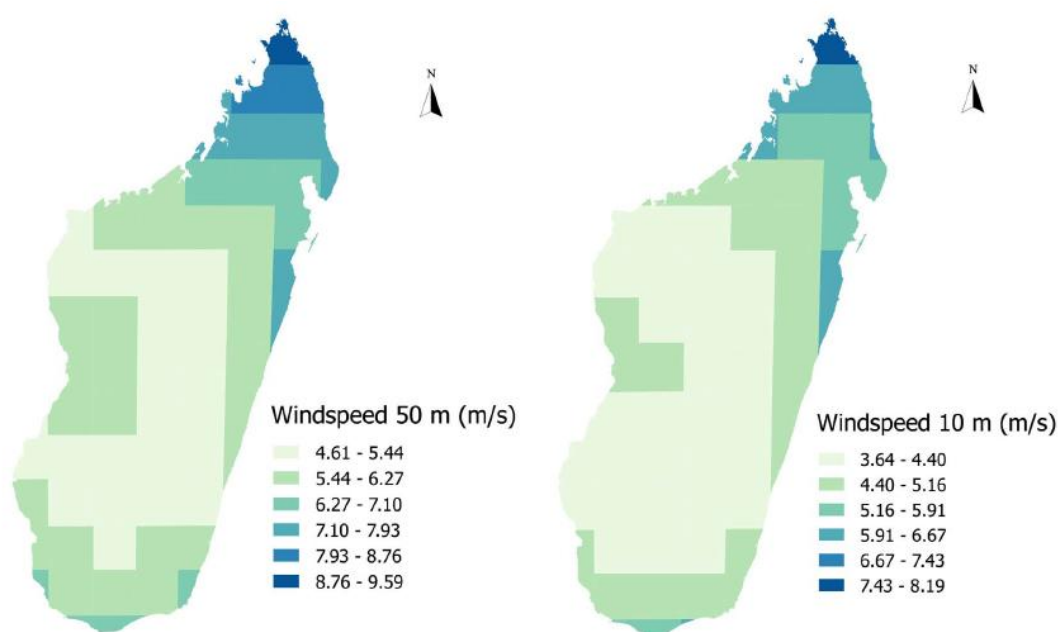


Figura 41. Atlas de velocidad del viento en Madagascar [27]

En el norte, la velocidad media del viento es de 8 m/s con una elevación de 50 m y 10 m. Dos regiones pueden aprovechar esta situación: Diana y Sava, en especial Diana, que tiene una alta densidad de población, alto potencial eólico y una buena conexión con otras partes del país.

En el centro, y principalmente en la costa este, el potencial eólico medio es aproximadamente de 6 m/s, pero hay que tener en cuenta dos obstáculos: los ciclones y la vegetación. Como se dijo anteriormente, hay entre uno y cinco ciclones durante el verano austral, y como las turbinas eólicas no pueden soportar ciclones, se deben tomar precauciones especiales para las turbinas eólicas instaladas en esta zona. Además, debido a la densidad de vegetación, se debe elegir el sitio propicio para instalarlos y obtener óptimamente el potencial eólico.

En el sur, se indica un potencial medio de 6 m/s de velocidad del viento y el potencial máximo se encuentra principalmente en la región del extremo sur. El sur de Madagascar tiene un clima árido con una baja densidad de población.

Hay varios proyectos planteados para este sector energético, pero debido a la falta de financiación, y a la distancia que existe entre los lugares potenciales y los lugares que necesitan la energía no es factible, por el momento, progresar en este campo.

#### 3.2.2.6. Energía marina

El uso de las energías marinas puede ser considerado en Madagascar y particularmente la energía térmica oceánica, la energía de corrientes y la energía undimotriz.

##### 3.2.2.6.1. Energía térmica oceánica

La energía térmica oceánica permite la producción de electricidad con agua fría del mar a 1000 m de profundidad y 5 °C, y agua superficial como fuente caliente a más de 20 °C. Esta diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ), puede producir electricidad. Actualmente, las empresas eléctricas trabajan sobre el tema y se han iniciado recientemente muchos estudios en Francia, Japón, Corea del Sur y Estados Unidos. De hecho, es necesario tener un  $\Delta T > 20$  °C para hacer funcionar una planta térmico-oceánica. Este  $\Delta T$  se obtiene a 6-10 km de la costa dependiendo de la ubicación (ver tabla 3). El mejor sitio para una planta *offshore* es la región de Andranovondronia.

Tabla 3. Mínima distancia entre costa y 1 km de profundidad y diferencial térmico medio anual en Madagascar [22]

Location	Distance (km)	$\Delta T$
Andranovondronina	6	21
Masondrono	8.2	21
Ampondrabe	8.7	22
Vohemar	9.3	21
St Augustin	8.4	20

### 3.2.2.6.2. Energía olamotriz

La energía de las olas es convertida por los dispositivos WEC en electricidad. Actualmente, muchos conceptos técnicos están en desarrollo como: OCW, sistemas de absorción, dispositivos de rebase, dispositivos de impacto y sistemas de flotación.

En un estudio preliminar, el potencial del oleaje se mide en términos de densidad de energía por cresta de onda (kW/m). Dependiendo de las tecnologías, el recurso necesario será diferente. Madagascar tiene un alto potencial para extraer energía de las olas ya que, al sur de la isla, en la región de Tolagnaro, el promedio anual alcanza los 50 kW/m.

### 3.2.2.6.3. Energía mareomotriz

Las presas de marea usan la energía potencial de la elevación de las mareas. Lo principal es capturar una parte de la marea y mantenerla fuera de la marea natural, creando, de esta forma, una diferencia en el nivel del agua entre el mar y el agua encerrada. Se permite que el agua se estabilice y después genera electricidad pasando a través de una turbina. El dispositivo puede ser unidireccional o bidireccional. Se ha supuesto que, en promedio, se requiere un margen de al menos 5 m para que las barreras de marea sean económicamente viables. Debido a la ubicación de Madagascar, la marea oceánica induce la elevación de las mareas sobre la costa continental de África Oriental y la occidental de Madagascar, cerca de Nosy Chesterfield. Las mareas de la costa occidental de Madagascar se clasifican como macromareas, definidas por [28], como aquellas con un rango de marea viva por encima de 4 m.

## 3.3. Batimetría

Conocer la batimetría de la zona de estudio es fundamental, dado que aspectos tan importantes como el oleaje que actúa sobre dicha zona o la tipología de tecnología que va a ser utilizada dependen de ella.

Se ha obtenido el mapa con la batimetría de la zona sobre el que se han hecho las mediciones correspondientes para obtener el perfil del lecho marino.

Se proceden a hacer 4 perfiles de costa: un perfil del lecho marino del sur de la ínsula, uno del sureste, otro del este y, por último, uno del noreste. Se han escogido estos flancos de la isla, ya que la zona de interés para el estudio es la que está más expuesta al océano Índico y, con esta distribución, se tendrá una amplia perspectiva de la zona.

### 3.3.1. Costa sur

En la figura 42 podemos observar la parte sur del mapa de la isla donde se destacan las isobatas de este entorno.

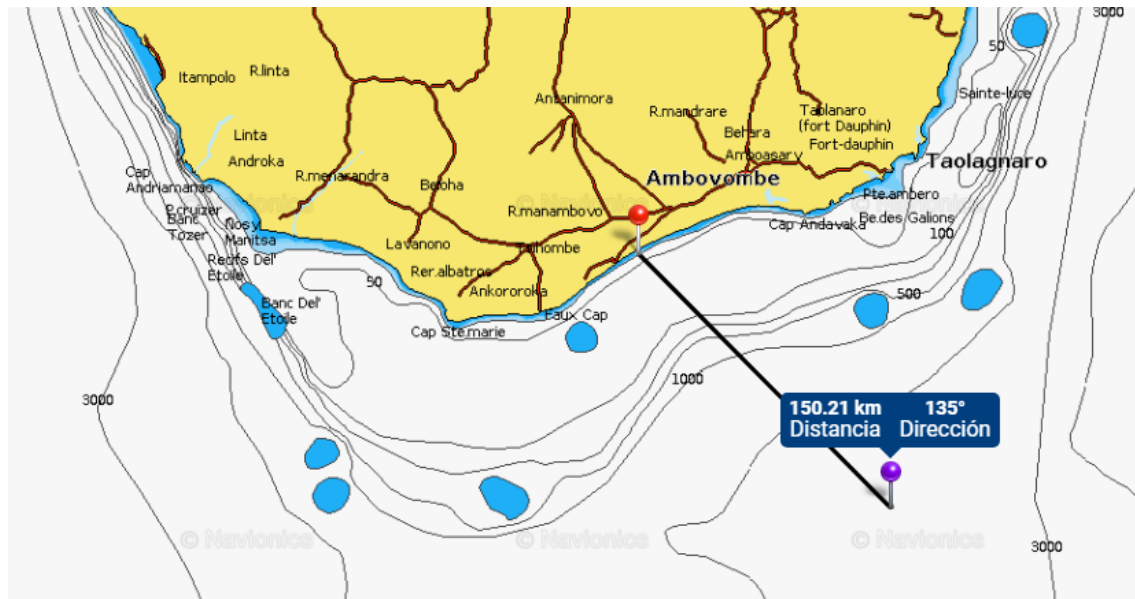


Figura 42. Mapa batimétrico de la costa sur de Madagascar, navionics.com

Dentro de un marco de 150 km se han medido las distancias entre las isobatas y se ha generado el perfil de costa que se muestra en la figura 43 a partir de los datos de la tabla 4.

Tabla 4. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa sur de Madagascar.

Distancia (m)	Profundidad (m)
0	0
3000	10
7300	50
39000	100
43000	200
52300	500
63000	1000
100000	2000

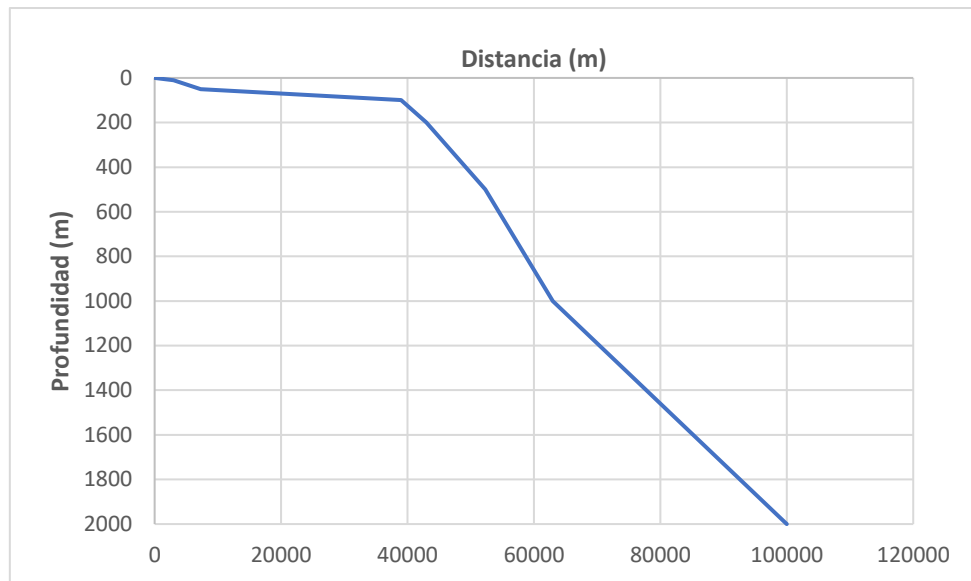


Figura 43. Perfil de la costa sur de Madagascar.

Se puede apreciar que en los primeros 40 kilómetros de distancia el desnivel es muy suave, pero a partir de ese punto la profundidad comienza a acentuarse más hasta alcanzar los 2000 metros a los 100 kilómetros de distancia de la costa.

### 3.3.2. Costa sureste

En la figura 44 podemos observar la parte sureste del mapa donde se destacan las isobatas de este entorno.

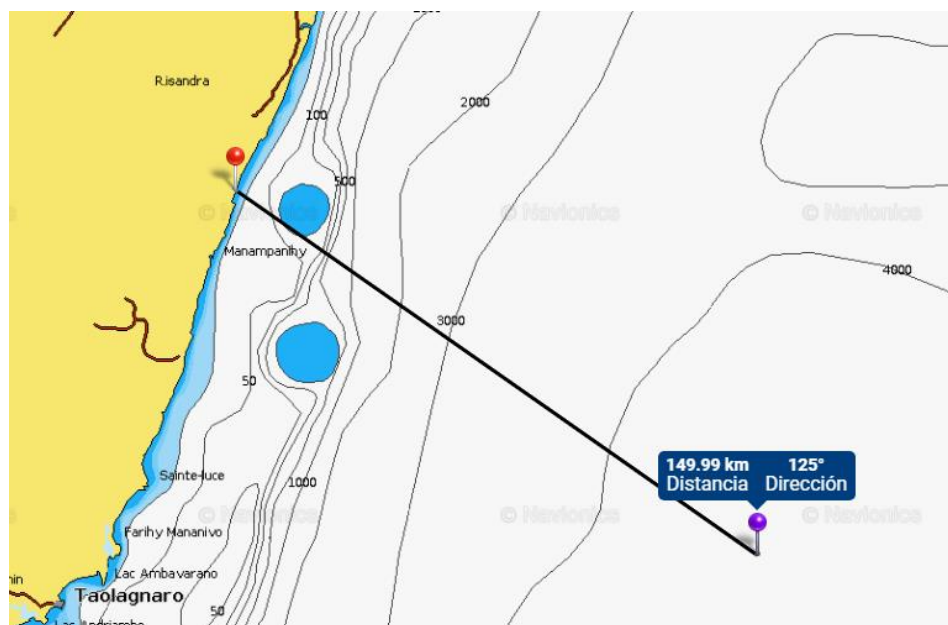


Figura 44. Mapa batimétrico de la costa sureste de Madagascar, navionics.com

Dentro de un marco de 150 kilómetros se han medido las distancias entre las isobatas y se ha generado el perfil de costa que se muestra en la figura 45 a partir de los datos de la tabla 5.

Tabla 5. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa sureste de Madagascar.

Distancia (m)	Profundidad (m)
0	0
4000	40
34300	200
38000	1000
52000	2000
62000	3000
118000	4000

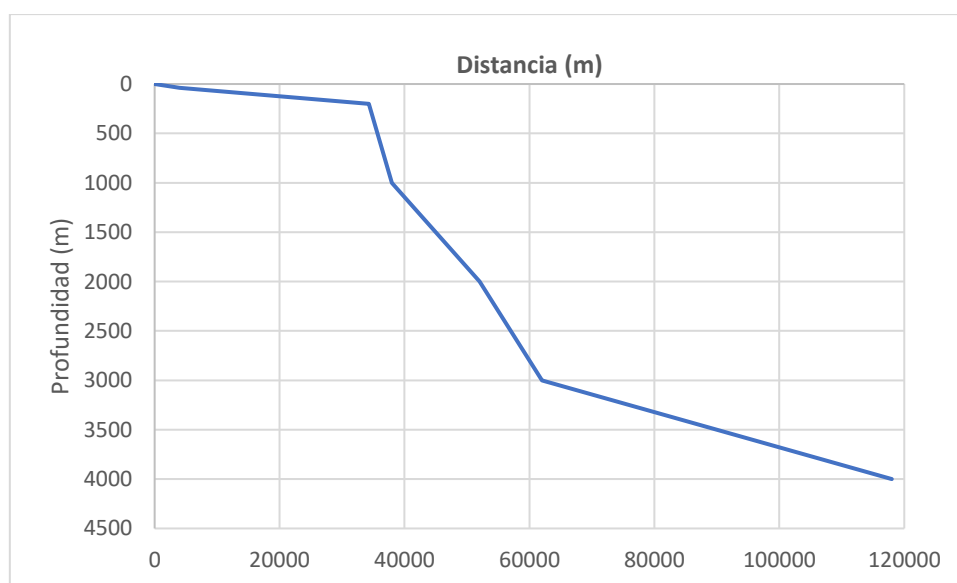


Figura 45. Perfil de la costa sureste de Madagascar.

Se puede apreciar que en los primeros 34 kilómetros de distancia el desnivel es muy suave, pero a partir de ese punto la profundidad comienza a acentuarse más hasta alcanzar los 3000 metros a los 62 kilómetros. Después de alcanzar esta profundidad, comienza a suavizarse de nuevo hasta alcanzar los 4000 metros de profundidad a los 118 kilómetros de distancia.

### 3.3.3. Costa este

En la figura 46 podemos observar la parte este del mapa donde se destacan las isobatas de este entorno.

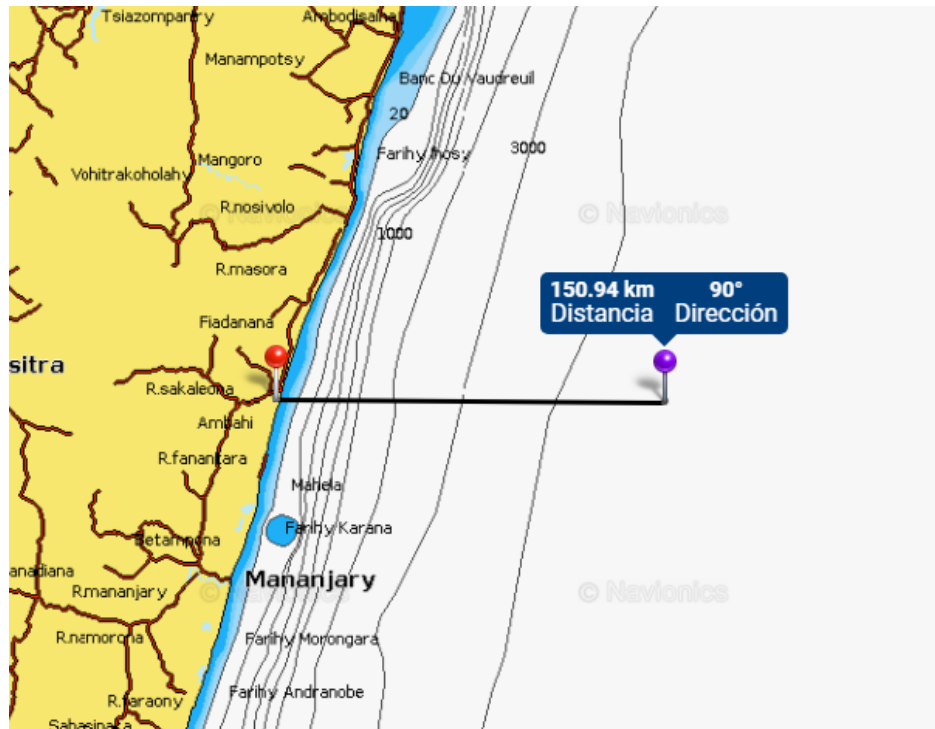


Figura 46. Mapa batimétrico de la costa este de Madagascar, navionics.com

Dentro de un marco de 150 kilómetros se han medido las distancias entre las isobatas y se ha generado el perfil de costa que se muestra en la figura 47 a partir de los datos de la tabla 6.

Tabla 6. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa este de Madagascar.

Distancia (m)	Profundidad (m)
0	0
4000	40
27600	200
36000	1000
46300	2000
74000	3000
137000	4000

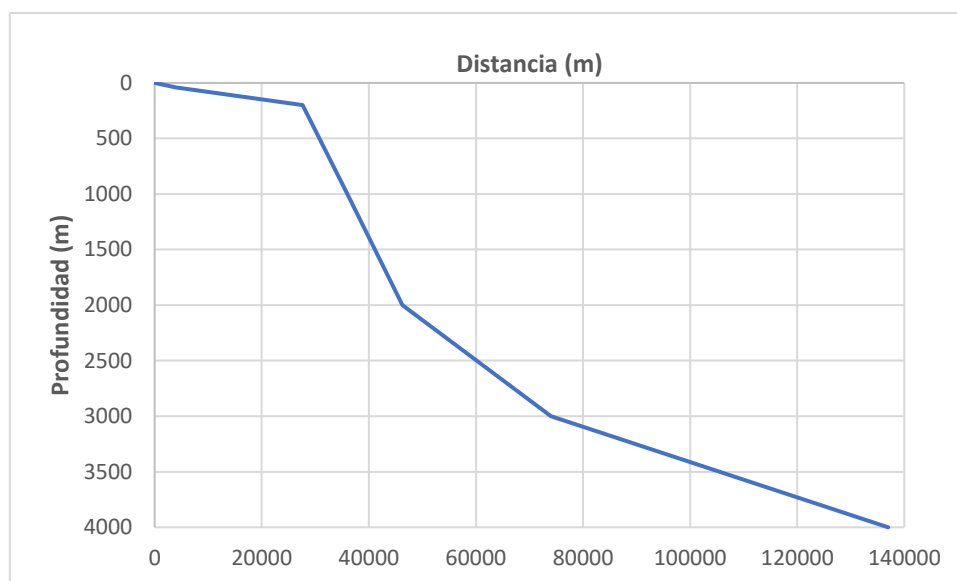


Figura 47. Perfil de la costa este de Madagascar.

Se puede apreciar que en los primeros 27,6 kilómetros de distancia el desnivel es muy suave, pero a partir de ese punto la profundidad comienza a acentuarse más hasta alcanzar los 2000 metros a los 46,3 kilómetros. Luego se suaviza un poco hasta llegar a los 3000 metros para poco después suavizarse del todo hasta alcanzar los 4000 metros de profundidad a los 137 kilómetros de distancia de la costa.

#### 3.3.4. Costa noreste

En la figura 48 podemos observar la parte noreste del mapa donde se destacan las isobatas de este entorno.

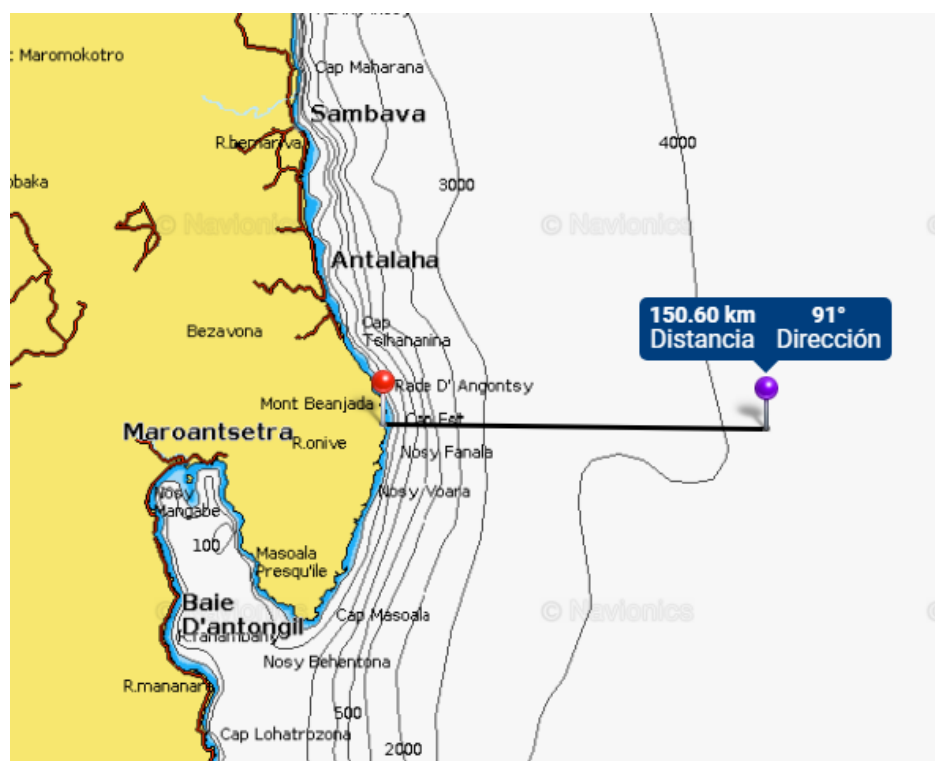


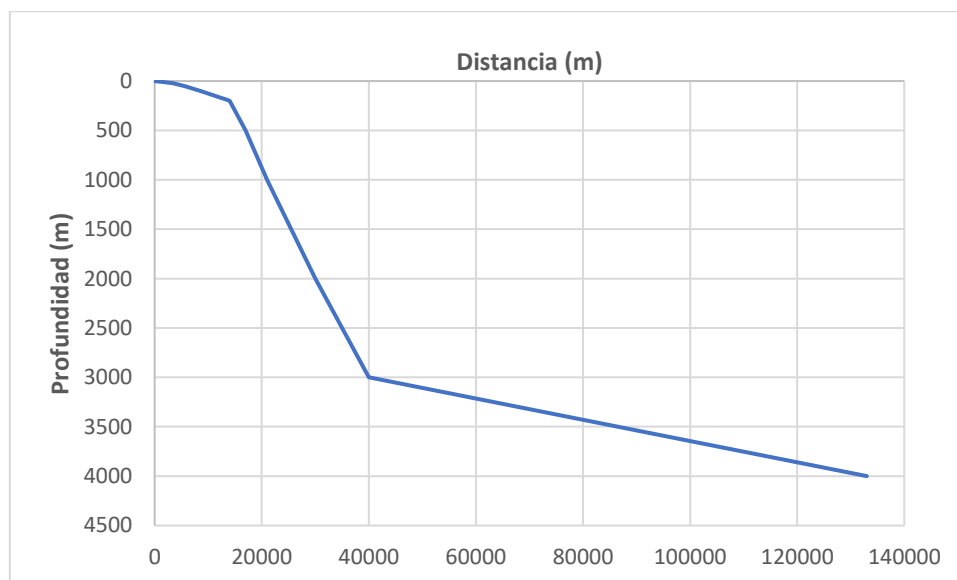
Figura 48. Mapa batimétrico de la costa norte de Madagascar, navionics.com



Dentro de un marco de 150 kilómetros se han medido las distancias entre las isobatas y se ha generado el perfil de costa que se muestra en la figura 49 a partir de los datos de la tabla 7.

*Tabla 7. Valores de distancia entre isobatas y profundidades en la costa noreste de Madagascar.*

Distancia (m)	Profundidad (m)
0	0
3300	20
5500	50
8600	100
14000	200
17000	500
21000	1000
30000	2000
40000	3000
133000	4000



*Figura 49. Perfil de la costa noreste de Madagascar.*

Se puede apreciar que en los primeros 14 kilómetros de distancia el desnivel es muy suave, pero a partir de ese punto la profundidad cambia bruscamente hasta alcanzar los 3000 metros a los 40 kilómetros. Luego se vuelve a suavizar hasta llegar a los 4000 metros a los 133 kilómetros de distancia de la costa.

## 4. Metodología

### 4.1. Datos utilizados

Los conjuntos de datos que se ha utilizado para este estudio pertenecen a la base de datos de oleaje obtenida mediante un modelo numérico y de reanálisis denominado *ERA Interim* del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, el cual cubre observaciones meteorológicas desde enero de 1979 hasta febrero de 2017. Estos conjuntos de datos pueden ser descargados del sitio web de ECMWF [29] en formato NetCDF.

*Era Interim* tiene una cobertura global desde los 90° Sur a 90° Norte y 180° Oeste a 180° Este, con una resolución espacial de 1,5° x 1,5° y una resolución temporal de 6 horas. Aparte de las variables atmosféricas, también incluye parámetros de oleaje. También es una de las primeras herramientas, justo después de ERA-40, de reanálisis global y ha sido obtenida con el modelo de oleaje WAM [30] y con un modelo de circulación atmosférica.

*Era Interim* no es enteramente homogéneo, debido principalmente a los cambios en los productos asimilados a partir de los datos de satélite utilizados en el proceso. Las alturas de ola bajas tienden a ser sobreestimadas y las altura de ola mayores tienden a ser subestimadas. Esta característica es genérica de *ERA Interim* y no específica de una parte en concreto. Este conjunto de datos está dividido en 4 periodos para hacer más llevadero el proceso de asimilación de datos.

Los sistemas de reanálisis de datos como *ERA Interim* a medida que van haciendo simulaciones en base al modelo numérico van refinando los resultados, obteniendo, de esta forma, valores fiables que ya tienen en cuenta las mediciones por satélite para todo tipo de situaciones. Sólo durante tormentas muy intensas es probable que los resultados obtenidos sean menos fiables, pero aun así se aprecia gran parecido con la realidad.

Considerando esto, algunos estudios han utilizado datos de boyas para modificar la altura de ola significativa ( $H_s$ ), pero se han llegado a desarrollar técnicas de separación del espectro de mar de viento y mar de fondo (en inglés *wind-sea* y *swell*).

En general, *Era Interim* es una buena opción para separar el mar de fondo y el de viento debido a la alta resolución, tanto espacial como temporal, y la larga duración de las series de tiempo. Además, ha sido muy utilizado en estudios de carácter *wind-sea* y *swell*, especialmente en el Norte del Atlántico, en el Norte del Pacífico y en Océano Antártico. En este estudio, la precisión de *ERA Interim* está verificada contra mediciones altimétricas por satélite de la altura de ola significativa. Claramente, muestra una buena consistencia en los datos observados.

Debido a que los conjuntos de datos de *Era Interim* no proporcionan información acerca de la variable periodo de pico ( $T_p$ ), se procedió a buscar una nueva fuente de datos en el Océano Índico que contuviese información fiable de  $H_s$ ,  $T_m$  y  $T_p$  para poder hallar una función  $T_s$  ( $T_m$ ,  $H_s$ ), donde  $T_m$  es el periodo medio del oleaje. De esta forma, se podría aplicar a los datos obtenidos de la extracción y pasar a la fase de análisis, la cual necesita la variable  $T_e$  (periodo energético), o en su defecto  $T_p$  que permite estimar  $T_e$ .

Se encontró una fuente de datos del *Southern African Centre for Oceanography (SADCO)* [31] la cual aportó datos de las costas sudafricanas del Índico más cercanas a Madagascar. Se analizaron todas las series de datos, pero desafortunadamente se halló una dispersión muy alta entre  $T_m$  y  $T_p$  en todas. Después de revisar los datos, se observó que las mediciones tomados de  $T_p$  por las boyas en esa área no eran precisas y tenían demasiada dispersión entre ellas, lo cual hace de

esta fuente no fiable para el objetivo del estudio. Podemos observar la dispersión en las mediciones tomadas de la variable  $T_p$  comparando la figura 50 y la figura 51, las cuales muestran un histograma de datos de  $T_m$  y  $T_p$ , respectivamente. Se aprecia en la figura 51 que los saltos entre valores de  $T_p$  son muy grandes y desordenados.

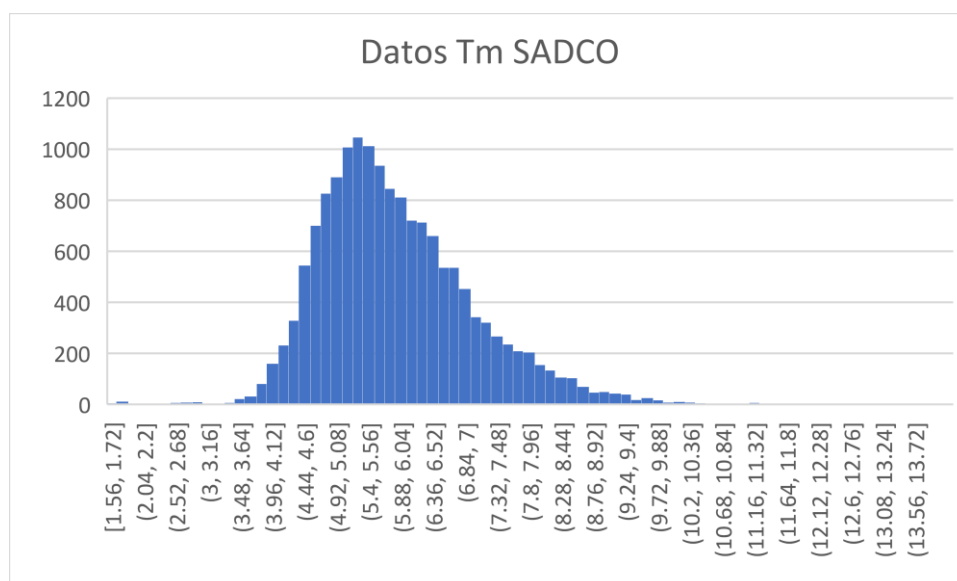


Figura 50. Distribución de datos de  $T_m$  de SADC.

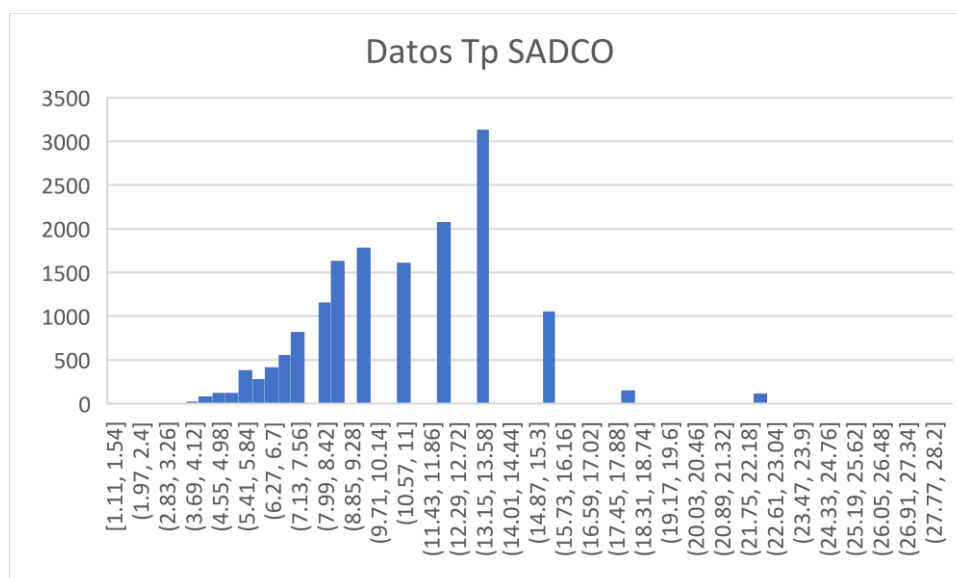


Figura 51. Distribución de datos de  $T_p$  de SADC.

Al no encontrar ninguna otra fuente de datos en el océano Índico, se decidió analizar los datos obtenidos en otro estudio del Mar Mediterráneo y extrapolarlos al océano Índico, ya que estas mediciones fueron llevadas a cabo por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la *Universitat Politècnica de Catalunya*, y hace del estudio una fuente fiable de donde se pueden extraer conclusiones más precisas acerca de una relación entre el parámetro  $T_p$  y  $T_m$ .

### 4.2. Procesado de datos

Para la extracción de información de los archivos obtenidos mediante *Era Interim* se ha procedido a crear un código (ver Apéndice 1) que nos permite reducir las dimensiones de los datos a procesar, limitándose a los que nos interesen de la zona de estudio. Por otro lado, los datos resultantes de la extracción son la serie temporal de variables  $H_s$ ,  $T_m$  y  $\theta_0$  (dirección del oleaje).

Lo primero de todo es seleccionar el sector de Madagascar con el que trabajar. Para elegir la zona de interés, nos basamos en la visualización de datos del archivo NetCDF y se observa que la costa de la zona sur y este es la que muestra mayores alturas de ola y, por lo tanto, es la que tiene mayor potencial. Este resultado era de esperar, ya que las  $H_s$  del lado oeste están limitadas por los *fetchs* reducidos debidos a la presencia de la costa del continente africano. Una vez indicado que se está interesado en estudiar la zona este y sureste de la isla, se estipula un área de actuación de un radio máximo de 150 km desde el litoral.

Esto se procede a hacer mediante una máscara creada a partir del espacio existente entre la imagen de Madagascar del archivo NetCDF con una imagen creada que expande 2 píxeles la original. Al extraer el espacio que ocupa la imagen original al espacio que ocupa la imagen expandida, obtenemos la máscara con el espacio de actuación frente a la costa derecha del país. Como aclaración, se elige una expansión de 2 píxeles dado que vistas las características del archivo NetCDF, 1 píxel son aproximadamente unos 75 km, por lo que 2 píxeles son aproximadamente 150 km.

Una vez obtenido el espacio de actuación, y los píxeles dentro de él, el propio código divide los píxeles dentro de éste de forma radial y analiza los valores de altura de ola para cada píxel de la línea y el que tenga el valor más alto de altura media es escogido.

Una vez encontrados los puntos con mayor valor de altura media, se escogen los 9 de mayor valor y se extrae un documento en el que proporciona, para cada 6 horas, su  $H_s$  y  $T_m$ . El número de puntos escogido ha sido 9, que se considera suficientemente representativo para tener una idea de la magnitud del recurso energético en la zona de Madagascar.

Para conseguir correlacionar  $T_p$  y  $T_m$ , como se comentó anteriormente, se analizan 25 archivos de mediciones en distintos puntos del Mar Mediterráneo compuestos de unos aproximadamente 5.600.000 datos cada uno. Sobre estos archivos de datos hemos procedido a hacer varios tipos de regresiones: tanto lineales como no lineales. Una vez llevadas a cabo, se observa que la regresión lineal de múltiples variables es la que obtiene mejores resultados, con una mayor correlación entre variables, tal como se observa en la figura 52.

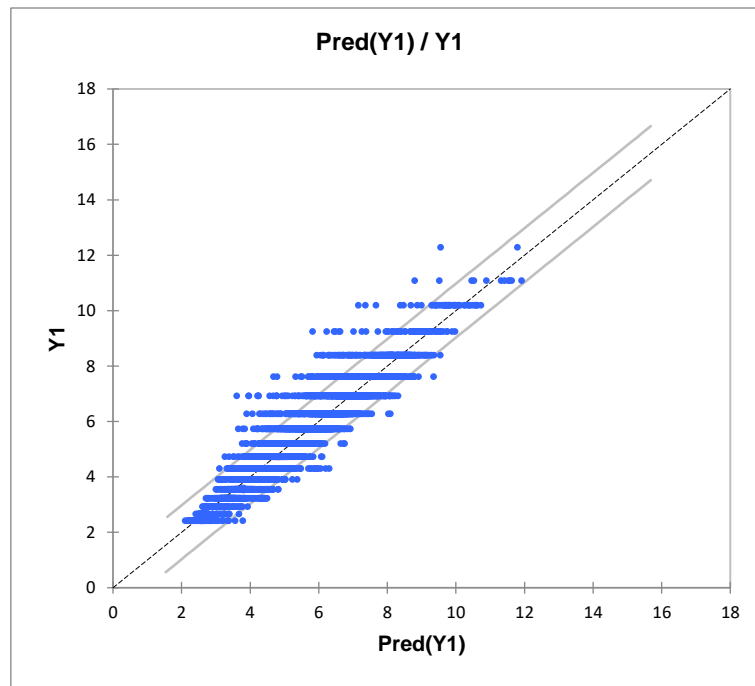


Figura 52. Comparación entre los valores de  $T_p$  medidos y los obtenidos mediante la regresión.

Por lo que finalmente, se ha podido deducir una relación entre  $T_p$  y  $T_m$  en la que interviene la variable  $H_s$  también y que es la dada por la ecuación (1).

$$T_p = -0.241 * H_s + 1.325 * T_m - 0.658 \quad (1)$$

Una vez obtenida esta relación, se puede proceder al análisis de los datos extraídos mediante el proceso descrito en [32]–[34].

### 4.3. Metodología de cálculo

Los puntos seleccionados para el estudio, tal y como se muestran en la figura 53, han sido los escogidos alrededor de la costa sur y la costa este de Madagascar, debido a que presentan los valores de altura de ola significativa más elevados en un perímetro de 100 kilómetros desde la franja litoral de la isla. Todos los puntos están situados en zona de aguas profundas y, por lo tanto, no se ven afectados por procesos de propagación como la difracción y la refracción. Las coordenadas de dichos puntos se listan a continuación en la tabla 8.

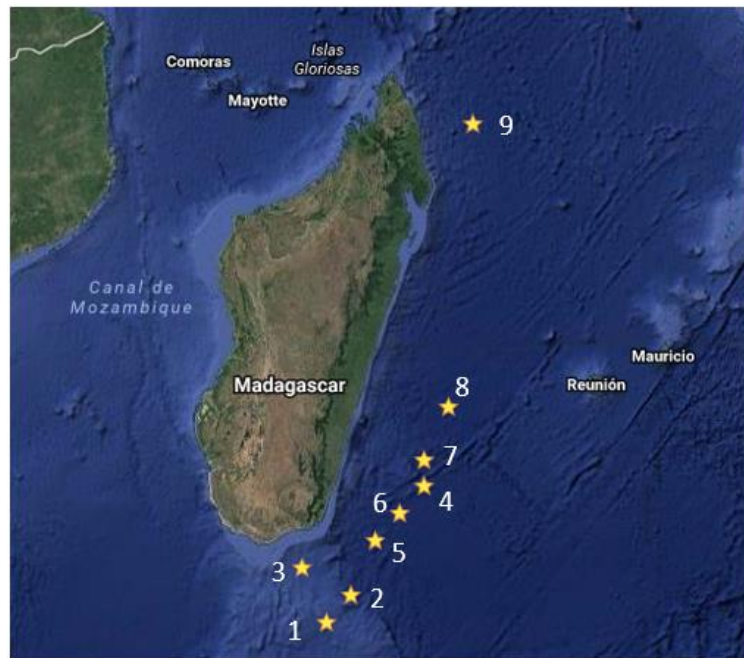


Figura 53. Localización de los puntos de estudio, google maps.

Tabla 8. Coordenadas de los puntos estudiados.

Punto	Latitud (°)	Longitud (°)
1	-27.75	47.25
2	-27.00	48.00
3	-26.25	46.50
4	-24.00	50.25
5	-25.50	48.75
6	-24.75	49.50
7	-23.25	50.25
8	-21.75	51.00
9	-13.50	51.75

La energía de ola se puede obtener mediante la expresión (2) para oleaje en zona de aguas profundas.

$$P = \frac{\rho * g^2}{64 * \pi} * H_S^2 * T_e \approx 0.49 * H_S^2 * T_e \quad (2)$$

Donde P es la potencia del oleaje por unidad de anchura de cresta (kW/m),  $H_s$  es la altura de ola significativa,  $T_e$  es el periodo energético,  $\rho$  es la densidad del agua de mar (la cual se supone como 1025 kg/m<sup>3</sup>) y g es la constante de gravedad.  $T_e$  se calcula como una función de momentos espectrales, tal y como muestra la expresión (3).

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (3)$$

Los estados del mar medidos suelen estar especificados en términos de la altura de ola significativa  $H_s$  y el periodo de pico  $T_p$  o periodo medio  $T_m$ . El periodo energético difícilmente es especificado y se tiene que estimar a partir de otras variables cuando los momentos espectrales no son conocidos. En este caso, se procederá a hacer una aproximación mediante el periodo de pico, que vendrá definido a su vez por el periodo medio en el Océano Índico. La expresión (1) muestra la relación entre estas dos últimas variables, mientras que la expresión (4) define la relación entre el periodo de pico y el periodo energético.

$$T_e = \alpha * T_p \quad (4)$$

Donde  $\alpha$  es un coeficiente cuyo valor depende de la forma del espectro de la ola (si sigue un espectro de *Pierson-Moskowitz* alcanzaría un valor de 0.86 y aumentaría hacia la unidad contra menos ancho espectral tuviese). Debido a que la zona de estudio tiene unos *fetchs* muy extensos, no se observa ningún tipo de predominancia del mar de viento sobre el mar de fondo o viceversa. Es por ello por lo que, como se sugiere en las referencias [32]–[34], el valor escogido para formular  $T_e$  será 0,9 veces  $T_p$ .

Con las expresiones (2), (4) y (1), la potencia del oleaje en un punto puede ser evaluada, permitiendo el cálculo de la energía media en cada punto. Esta evaluación puede, también, ser realizada para varias direcciones en cada punto con el fin de obtener una distribución direccional de la energía de oleaje. Como se comenta anteriormente, esta evaluación de la energía de ola utiliza un conjunto de datos de 38 años de simulaciones numéricas.



## 5. Resultados

### 5.1. Distribución espacial

La figura 54 muestra la potencia media del oleaje en los 9 puntos de estudio alrededor de la costa este de Madagascar. En esta gráfica, se pueden distinguir 3 tramos con diferentes potenciales: una sección con mayor rango de potencias en el sur de la isla, de los puntos 1 al 3, con una potencia media superior a 30 kW/m; un rango de potencias medio en el sureste, de los puntos 4 al 7, con una potencia media entre los 30 y los 20 kW/m; y un rango más bajo de energía al este y noreste, en los puntos 8 y 9 respectivamente, por debajo de los 20 kW/m.

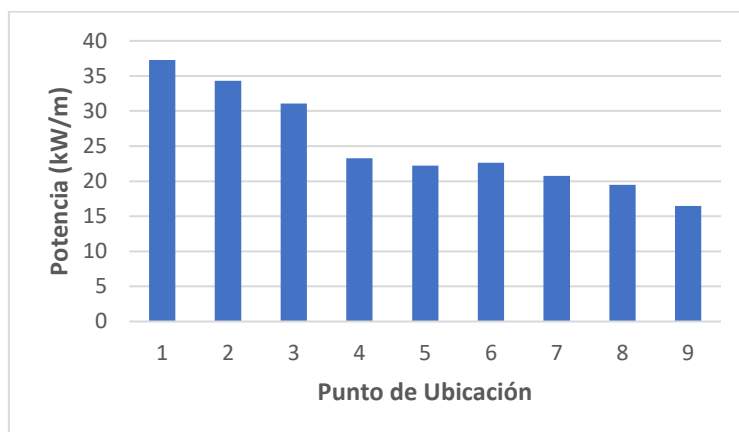


Figura 54. Potencia media anual en los 9 puntos de estudio.

Otro factor a tener en cuenta es la dirección del oleaje y cómo los puntos de estudio quedan expuestos a éste. La distribución direccional de la potencia de oleaje es importante para los WECs que no son del tipo absorbedor, tales como los atenuadores o terminadores. La figura 55 y la tabla 9 muestran la potencia media anual respecto a la distribución direccional de las olas que llegan a cada punto. En la mayoría de los casos, especialmente en aquellos localizados en el sur, sureste y este de la isla, adquieren mayoritariamente energía del SW, seguido de SSW y WSW; exceptuando el punto 8 que solamente recibe potencia desde el SSW. El punto localizado en el noreste, el punto 9, al estar más expuesto al oleaje procedente del este adquiere su potencia mayoritariamente de SSW y de SSE. Podemos resumir así, que en los puntos 1 al 7 el oleaje dominante es el SW, en los puntos 8 y 9 es el SSW.



Figura 55. Potencia direccional media anual para cada punto de estudio.

Tabla 9. Potencia media anual respecto a las direcciones de oleaje para cada punto de estudio.

Punto	Potencia media por dirección (kW/m)							
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
1	29.2	32.28	28.03	27.64	30.76	31.56	32.4	33.8
2	24.3	32.43	24.26	24.37	28.11	28.83	30.39	31.68
3	24.24	28.41	29.86	22.82	26.04	27.42	28.14	28.7
4	18.66	16.75	16.76	16.02	19.46	20.56	21.53	24.08
5	24.68	18.2	16.15	16.77	19.5	20.48	21.25	23
6	18.18	15.97	15.77	15.84	19.27	20.4	21.31	23.57
7	19.92	16.07	15.34	14.5	17.44	18.6	19.63	22.53
8	23.1	19.1	15.08	13.91	15.56	17.51	18.1	21.49
9	8.62	10.35	11.05	7.94	7.7	13.82	18.3	23.56

Punto	Potencia media por dirección (kW/m)							
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	36.2	46.35	59.02	45.09	36.51	32.32	28.15	31.88
2	34.8	44.94	54.3	36.68	29.29	29.88	28.7	28.01
3	30.51	38.31	50.93	34.49	26.8	22.36	22.09	29.86
4	29.57	41.44	48.28	41.46	21.11	23.64	32.29	18.34
5	26.54	35.28	37.06	15.45	20.05	0	14.57	29.06
6	28.08	37.55	37.65	19.12	27.81	26.44	19.84	18.1
7	28.52	44.18	47.15	47.4	0	0	0	17.77
8	28.24	43.57	16.79	0	0	0	0	0
9	21.48	24.81	12.74	11.62	11.52	12.42	13.46	12.88

## 5.2. Variabilidad temporal

Este apartado se centra en analizar las fluctuaciones estacionales y mensuales de potencia del oleaje en los 9 puntos de estudio. La tabla 10 muestra el fuerte carácter estacional de la energía del oleaje de Madagascar, con un destacable rango de variación entre estaciones. Cabe destacar, que el estudio se desarrolla en un país localizado en el hemisferio sur y, por lo tanto, las estaciones del hemisferio norte se ven invertidas siendo el orden estacional el siguiente: de septiembre a noviembre es primavera, de diciembre a febrero es verano, de marzo a mayo es otoño y de junio a agosto es invierno. La energía undimotriz comienza a incrementar en otoño, alcanzando su pico en invierno, disminuyendo en primavera y tocando su mínimo en verano. Esto se ve reflejado de una forma más visual en la figura 56. Promediando en los 9 puntos, sobre un 32,76 % de la potencia anual del oleaje corresponde a invierno, 25,08 % a otoño, 23,47 % a primavera y 18,69 % a verano. Es tanta la diferencia que los recursos energéticos de oleaje de Madagascar son casi 2 veces mayores en invierno que en verano.

Tabla 10. Potencia media del oleaje en función de la estación del año para cada punto de estudio.

Punto	Potencia media para cada estación (kW/m)			
	Dic-Feb (verano)	Mar-May (otoño)	Jun-Ago (invierno)	Sep-Nov (primavera)
1	27.9	37.11	47.92	36.32
2	25.81	34.23	44.12	33.23
3	23.9	31.34	38.97	30.06
4	17.94	23.95	30.17	21
5	17.47	22.59	27.81	20.95
6	17.69	23.25	28.87	20.75
7	15.99	21.46	27.01	18.51
8	14.48	20.08	26.17	17.13
9	8.96	14.22	27.09	15.7

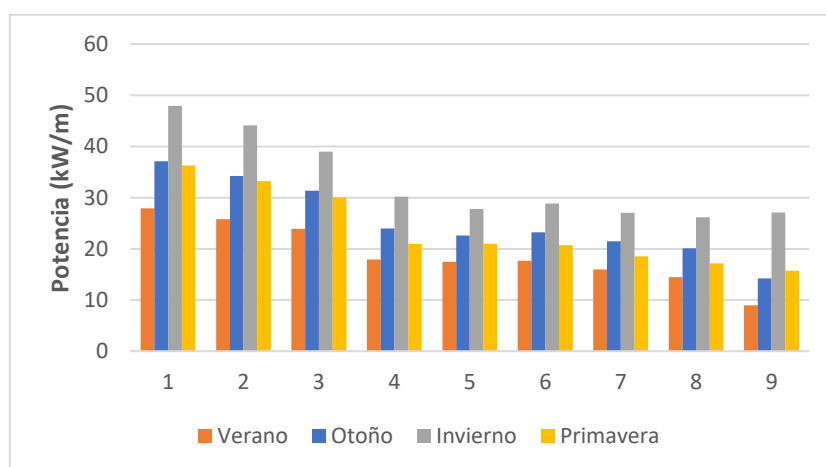


Figura 56. Fluctuación estacional de energía en los puntos de estudio.

La tabla 11 muestra la potencia media mensual en los 9 puntos en los que se ha basado el estudio. Una clara tendencia estacional es observable, como ya se ha comentado con anterioridad, alcanzando sus más altos valores en los meses de invierno (Junio-Agosto) y su pico en Julio. Después de invierno, el potencial de oleaje cae a sus valores más bajos en verano (Diciembre-Febrero), con sus mínimos valores en Diciembre. En media, la potencia en el mes de Julio es 2,1 veces la de Diciembre. La figura 57 indica el potencial medio mensual de los 9 puntos, los cuales son representativos respecto al nivel energético de Madagascar y la anteriormente mencionada tendecia estacional.

*Tabla 11. Potencia media mensual para cada punto de estudio.*

Punto	Potencia media por mes (kW/m)					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
1	26.89	31.42	31.59	36.6	43.13	48.6
2	24.65	29.47	29.09	33.84	39.74	44.72
3	22.94	27.25	27.36	31.13	35.51	39.44
4	17.3	21.73	20.79	23.85	27.19	30.3
5	16.8	20.91	19.85	22.58	25.34	27.77
6	17.09	21.37	20.29	23.22	26.22	28.95
7	15.42	19.56	18.74	21.36	24.28	26.99
8	13.86	17.76	17.31	19.86	23.07	26.18
9	8.55	10.44	9.88	13.46	19.29	24.84

Punto	Potencia media por mes (kW/m)					
	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	48.97	46.19	43.11	36.03	29.82	25.54
2	45.05	42.57	39.5	32.96	27.25	23.47
3	39.76	37.69	35.09	29.85	25.24	21.65
4	30.97	29.23	25.24	20.89	16.86	14.92
5	28.42	27.22	24.65	21.12	17.07	14.81
6	29.59	28.07	24.69	20.78	16.77	14.73
7	27.78	26.26	22.31	18.48	14.75	13.09
8	26.94	25.38	21.01	17.01	13.36	11.94
9	28.66	27.78	21.3	15.46	10.37	7.93

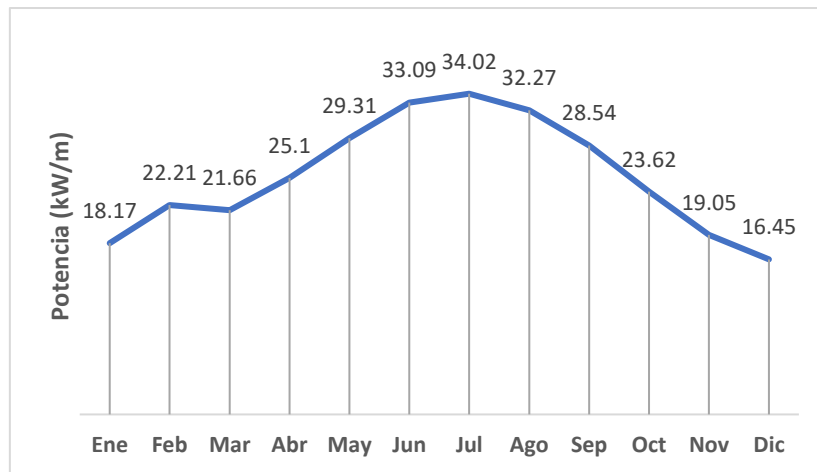


Figura 57. Potencia media mensual de todos los puntos.

Como en casi todos los análisis de oleaje, dos estadios pueden ser diferenciadas: un periodo de temporales desde mayo a septiembre y un periodo más laxo de octubre a abril. Los datos en la tabla 11 muestran una concentración de energía de ola durante la estación de temporales, con unos valores energéticos de aproximadamente el 52% de la energía media anual en los 9 puntos.

En el próximo apartado, se llevan a cabo análisis adicionales de variabilidad temporal en base a dos coeficientes de variabilidad. El objetivo es determinar el lugar adecuado para la instalación de dispositivos WEC.

### 5.3. Identificación de las mejores ubicaciones para el despliegue de WECs

La primera consideración a tener en cuenta para la ubicación de un dispositivo WEC es la cantidad de potencia de oleaje y el total de energía que se puede, potencialmente, obtener en dicho lugar, teniendo en cuenta su distribución respecto a la altura de ola, periodos y direcciones dominantes (ver figura 55 y tabla 9). En los puntos del 1 al 7, la dirección dominante es el SW, seguido del SSW y WSW. Singularmente, en el punto 8 la única dominante es la dirección SSW. Y en el punto 9, las principales direcciones energéticas son SSW y SSE.

Otro factor a tener en cuenta a la hora de escoger la localización de un WEC es la variabilidad temporal en diferentes escalas temporales: diaria, mensual y estacionalmente. Lugares con un flujo energético estable y moderado pueden ser más interesantes que lugares donde la energía, a pesar de ser más alta, es más inestable y menos fiable, ya que la eficiencia del dispositivo puede llegar a decrecer significativamente bajo condiciones de oleaje variable.

Se han propuesto diferentes coeficientes para definir la variabilidad temporal del potencial de oleaje en un lugar en particular. En este estudio, dos de los coeficientes propuestos en [32]–[34] son utilizados: el índice de variabilidad estacional (SV) y el índice de variabilidad mensual (MV). A continuación, podemos ver la definición de cada índice mediante las expresiones (5) y (6), respectivamente.

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_{Year}} \quad (5)$$

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P_{Year}} \quad (6)$$

Donde  $P_{S1}$  es la potencia media de la estación con aportación energética más alta, en este caso invierno, y  $P_{S4}$  es la potencia media de la estación con aportación energética más baja, en este caso verano.  $P_{M1}$  es la potencia media del mes con aportación energética más alta, en este caso julio, y  $P_{M12}$  es lo contrario, en este caso diciembre.  $P_{Year}$  es la potencia media anual del oleaje. Cuanto mayor es el valor de SV mayor es la variabilidad estacional, los valores por debajo de 1 indican una moderada variabilidad estacional. MV sigue la misma tendencia y tiene valores superiores a los de SV.

La tabla 12 muestra los valores de estos coeficientes de variabilidad y la potencia media anual en los 9 puntos de estudio. Ambos índices muestran valores similares del punto 1 al 8 (SV entre 0,47 y 0,6 y MV entre 0,58 y 0,77), lo cual sugiere que las olas muestran una variabilidad reducida en todas estas ubicaciones, dado que son valores inferiores a 1. Por otra parte, los valores de SV y MV para el punto 9 son superiores a 1, lo que indica que en esa localización las olas muestran bastante variabilidad.

Los puntos 1, 2 y 3 son los tres puntos que mayores niveles de energía ofrecen y con valores similares de SV y MV, por lo que pueden ser considerados como las áreas más prometedoras a lo largo de la costa malgache para la producción de energía undimotriz, teniendo en cuenta tanto la potencia energética como la variabilidad interanual. Otras zonas de interés, teniendo en cuenta que también cumplen lo que las anteriores son los puntos 4, 5 y 6.

*Tabla 12. Potencia media anual de oleaje y coeficientes de variabilidad temporal en los puntos de estudio.*

Punto	$P_{Year}$ (kW/m)	$P_{S1}$ (kW/m)	$P_{S4}$ (kW/m)	$P_{M1}$ (kW/m)	$P_{M12}$ (kW/m)	SV	MV
1	37.29	47.92	27.9	48.97	25.54	0.54	0.63
2	34.33	44.12	25.81	45.05	23.47	0.53	0.63
3	31.05	38.97	23.9	39.76	21.65	0.49	0.58
4	23.26	30.17	17.94	30.97	14.92	0.53	0.69
5	22.2	27.81	17.47	28.42	14.81	0.47	0.61
6	22.64	28.87	17.69	29.59	14.73	0.49	0.66
7	20.75	27.01	15.99	27.78	13.09	0.53	0.71
8	19.47	26.17	14.48	26.94	11.94	0.6	0.77
9	16.46	27.09	8.96	28.66	7.93	1.1	1.26

Hs \ Te		Te (s)																
		≥ 5	(5 - 5.5]	(5.5 - 6]	(6 - 6.5]	(6.5 - 7]	(7 - 7.5]	(7.5 - 8]	(8 - 8.5]	(8.5 - 9]	(9 - 9.5]	(9.5 - 10]	(10 - 10.5]	(10.5 - 11]	(11 - 11.5]	(11.5 - 12]	(12 - 12.5]	(12.5 - 13]
Hs (m)	≥ 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0.5 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1 - 1.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1.5 - 2]	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0	0	0	0
	(2 - 2.5]	0	0	0	0	0	0.02	0.04	0.07	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0
	(2.5 - 3]	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.08	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01
	(3 - 3.5]	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
	(3.5 - 4]	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
	(4 - 4.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0
	(4.5 - 5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(5 - 5.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(5.5 - 6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(6 - 6.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(6.5 - 7]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hs \ Te		Te (s)												
		≥ 4	(4 - 4.5]	(4.5 - 5]	(5 - 5.5]	(5.5 - 6]	(6 - 6.5]	(6.5 - 7]	(7 - 7.5]	(7.5 - 8]	(8 - 8.5]	(8.5 - 9]	(9 - 9.5]	(9.5 - 10]
Hs (m)	≥ 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1 - 1.5]	0	0	0.01	0.11	0.37	0.46	0.35	0.1	0.01	0	0	0	0
	(1.5 - 2]	0	0	0.01	0.65	2.45	3.48	3.01	2.25	0.95	0.27	0.05	0	0
	(2 - 2.5]	0	0	0	0.05	0.87	1.65	1.84	1.68	1.06	0.57	0.22	0.04	0
	(2.5 - 3]	0	0	0	0	0.04	0.2	0.32	0.32	0.24	0.19	0.09	0.04	0.01
	(3 - 3.5]	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0	0
	(3.5 - 4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 58. Tabla de encuentros mostrando la contribución de los varios estados del mar a la energía anual total en el punto 1 (Pelamis arriba y Wave Dragon abajo) en GWh.



Hs \ Te		Te (s)																
		≥ 5	(5 - 5.5]	(5.5 - 6]	(6 - 6.5]	(6.5 - 7]	(7 - 7.5]	(7.5 - 8]	(8 - 8.5]	(8.5 - 9]	(9 - 9.5]	(9.5 - 10]	(10 - 10.5]	(10.5 - 11]	(11 - 11.5]	(11.5 - 12]	(12 - 12.5]	(12.5 - 13]
Hs (m)	≥ 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0.5 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1 - 1.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1.5 - 2]	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0	0
	(2 - 2.5]	0	0	0	0	0	0.02	0.05	0.08	0.09	0.08	0.08	0.06	0.05	0.03	0.02	0.01	0
	(2.5 - 3]	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.06	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
	(3 - 3.5]	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
	(3.5 - 4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	(4 - 4.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0
	(4.5 - 5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(5 - 5.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(5.5 - 6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(6 - 6.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(6.5 - 7]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hs \ Te		Te (s)												
		≥ 4	(4 - 4.5]	(4.5 - 5]	(5 - 5.5]	(5.5 - 6]	(6 - 6.5]	(6.5 - 7]	(7 - 7.5]	(7.5 - 8]	(8 - 8.5]	(8.5 - 9]	(9 - 9.5]	(9.5 - 10]
Hs (m)	≥ 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1 - 1.5]	0	0	0.01	0.16	0.45	0.55	0.38	0.11	0.01	0	0	0	0
	(1.5 - 2]	0	0	0.02	0.68	2.54	3.8	3.13	2.27	0.92	0.25	0.04	0	0
	(2 - 2.5]	0	0	0	0.02	0.54	1.22	1.55	1.43	0.93	0.47	0.18	0.04	0
	(2.5 - 3]	0	0	0	0	0.02	0.14	0.21	0.2	0.18	0.13	0.06	0.03	0
	(3 - 3.5]	0	0	0	0	0	0	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0	0
	(3.5 - 4]	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0

Figura 59. Tabla de encuentros mostrando la contribución de los varios estados del mar a la energía anual total en el punto 2 (Pelamis arriba y Wave Dragon abajo) en GWh.

Hs \ Te		Te (s)																
		≥ 5	(5 - 5.5]	(5.5 - 6]	(6 - 6.5]	(6.5 - 7]	(7 - 7.5]	(7.5 - 8]	(8 - 8.5]	(8.5 - 9]	(9 - 9.5]	(9.5 - 10]	(10 - 10.5]	(10.5 - 11]	(11 - 11.5]	(11.5 - 12]	(12 - 12.5]	(12.5 - 13]
Hs (m)	≥ 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0.5 - 1]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1 - 1.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1.5 - 2]	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0	0
	(2 - 2.5]	0	0	0	0	0	0.02	0.05	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01
	(2.5 - 3]	0	0	0	0	0	0.01	0.04	0.08	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
	(3 - 3.5]	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	(3.5 - 4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0
	(4 - 4.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
	(4.5 - 5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(5 - 5.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(5.5 - 6]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(6 - 6.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(6.5 - 7]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hs \ Te		Te (s)												
		≥ 4	(4 - 4.5]	(4.5 - 5]	(5 - 5.5]	(5.5 - 6]	(6 - 6.5]	(6.5 - 7]	(7 - 7.5]	(7.5 - 8]	(8 - 8.5]	(8.5 - 9]	(9 - 9.5]	(9.5 - 10]
Hs (m)	≥ 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1 - 1.5]	0	0	0.02	0.16	0.51	0.75	0.68	0.29	0.06	0	0	0	0
	(1.5 - 2]	0	0	0.02	0.83	2.46	3.1	2.65	2	0.97	0.3	0.07	0	0
	(2 - 2.5]	0	0	0	0.04	0.88	1.31	1.23	1.01	0.56	0.24	0.13	0.03	0
	(2.5 - 3]	0	0	0	0	0.04	0.14	0.17	0.15	0.13	0.07	0.02	0	0
	(3 - 3.5]	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0
	(3.5 - 4]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 60. Tabla de encuentros mostrando la contribución de los varios estados del mar a la energía anual total en el punto 3 (Pelamis arriba y Wave Dragon abajo) en GWh.

Las figuras 58-60 muestran las tablas de encuentros de  $H_s$  y  $T_e$  para tres sitios preseleccionados (el resto de tablas se pueden ver en el Anejo 1), en este caso los puntos 1, 2 y 3. Las figuras muestran la energía total anual, en MWh, que puede ser extraída de cada estado del mar por un dispositivo *Pelamis* y un *Wave Dragon*. Con intervalos de 0,5 s para el periodo y 0,5 m para la altura de ola en el caso de *Pelamis* y de 1 s y 1 m en el caso de *Wave Dragon*. En cada punto, se puede observar que hay una zona de alto potencial energético: con *Pelamis* los puntos más energéticos se encuentran entre periodos de 7,5-11,5 s y alturas de ola de 2-3,5 m; con *Wave Dragon* los puntos más energéticos se localizan entre periodos de 7-11 s y alturas de ola de 1-3 m. Como es evidente, las olas más altas son las que están asociadas a los periodos más largos.

Por una parte, si tenemos en cuenta toda esta información podemos llegar a que los estados del mar con  $H_s$  entre 2 y 3,5 m, para *Pelamis*, forman entre el 79 y el 83% del total de la energía, mientras que con  $T_e$  entre 7,5 y 11,5 m conforman entre el 86 y el 88% del total, siempre dependiendo del punto al que nos refiramos.

Por otra parte, para un dispositivo *Wave Dragon*, podemos llegar a la conclusión de que con  $H_s$  entre 1 y 3 m se conforma del 84 y 93% de la energía y con  $T_e$  entre 7 y 11 s del 90 al 91% del total de la energía, también dependiendo del punto al que nos refiramos.

Como se resalta en [32]–[35], la potencia de oleaje asociada a menores frecuencias y altos estados energéticos no puede tenerse en cuenta, ya que su explotación requiere de infraestructuras sobredimensionadas y el uso de dispositivos WEC que, probablemente, no son capaces de funcionar correctamente en estados energéticos bajos. Además, debido a su baja frecuencia, su contribución a la energía anual no es muy alta.

La cantidad de energía eléctrica administrada por un WEC depende de la energía media de oleaje disponible en la localización del dispositivo, pero, asimismo, depende de la forma en la cual esta energía está distribuida. Esto es porque cada WEC tiene su propia matriz de potencia, indicando la potencia proporcionada por cada aparato, para cada rango de  $H_s$  y  $T_e$ .

En este estudio, dos WECs; cuyas matrices están disponibles; han sido considerados: *Pelamis* y *Wave Dragon*. Las matrices de potencia de ambos fueron obtenidas de la referencia [36]. Con estas matrices y la distribución de energía en función de la altura de ola  $H_s$  y periodo  $T_e$ , se calculó la potencia resultante para los 9 puntos analizados y los dos dispositivos, reflejando así los valores que se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Producción media anual de los dos dispositivos elegidos para los 9 puntos.

Punto	Pelamis (GWh)	Wave Dragon (GWh)
1	1.78	24.10
2	1.71	22.78
3	1.66	21.05
4	1.34	17.13
5	1.42	16.59
6	1.35	16.80
7	1.27	15.70
8	1.21	14.96
9	1.56	13.00

Estos valores reafirman que los tres puntos localizados al sur de Madagascar (1, 2 y 3) son los que tienen una potencia media más alta y son los que producirían una mayor energía para ambos WECs. Aunque el punto 9 (para *Pelamis*) y el punto 4 (para *Wave Dragon*) también deberían tenerse en cuenta al tener producciones medias anuales cercanas a las de los primeros puntos.

Otro importante factor que se debe tener en cuenta para valorar si es factible posicionar un dispositivo WEC en un lugar determinado es el factor de capacidad. Este parámetro es la relación entre la producción del WEC en un periodo de tiempo determinado y la energía producida si el dispositivo hubiese estado operando todo el tiempo a la máxima potencia. Este factor ha sido calculado para los 3 puntos de estudio seleccionados, tal y como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Factor de capacidad de los dos dispositivos elegidos para los 9 puntos.

Punto	Factor de capacidad (%)	Factor de capacidad (%)
1	27.09	35.28
2	26.03	33.34
3	25.27	30.81

Estos valores indican que los factores de capacidad de los puntos seleccionados están entre 25 y 27% para el dispositivo *Pelamis* y entre 30 y 35% para el dispositivo *Wave Dragon*, siendo este último el más productivo y eficiente de ambos analizados. El hecho de que los resultados del factor de capacidad de *Wave Dragon* superen el 30%, para los puntos seleccionados, quiere decir que su producción es eficiente y el precio del MWh se puede llegar a ver reducido.

Por último, para completar el siguiente análisis de eficiencia de ambos dispositivos, es necesario calcular su tiempo de inactividad o inoperabilidad. Este parámetro es, simplemente, el número de horas al año en las que un dispositivo no opera. Puede ser expresado mediante su número neto de horas y/o mediante la proporción de tiempo de las horas del año en las que no está operativo. En la tabla 15 se muestran ambas, de forma complementaria la una con la otra.

Tabla 15. Tiempo de inactividad/inoperabilidad de ambos dispositivos WEC en un año.

Punto	Pelamis				Wave Dragon			
	Tiempo de operabilidad		Tiempo de inoperabilidad		Tiempo de operabilidad		Tiempo de inoperabilidad	
	horas	%	horas	%	horas	%	horas	%
1	8250	94.18	510	5.82	8733	99.69	27	0.31
2	8250	94.18	510	5.82	8737	99.74	23	0.26
3	8387	95.74	373	4.26	8735	99.71	25	0.29

En el caso de *Pelamis*, el máximo valor de eficiencia alcanzado es 27,08% en el punto 1 y el mínimo 25,27% en el punto 3. Junto con su reducido tiempo de inactividad hace de este dispositivo una buena apuesta. No obstante, con el dispositivo *Wave Dragon* obtenemos un máximo valor de 35,28% en el punto 1 y un mínimo de 30,81% en el punto 3. Esto, junto con su casi inexistente tiempo de inactividad, hace de este dispositivo una mejor apuesta en términos de producción efectiva.

Tras haber hecho los anteriores análisis vistos en este capítulo y si se presta atención a los valores del factor de capacidad, considerado el parámetro más determinante, y el tiempo de inoperabilidad se puede afirmar que la mejor opción es el despliegue de dispositivos Wave Dragon desde el punto 1 al 3. Entre todas estas opciones, la alternativa más óptima sería la instalación de una granja de *Wave Dragon* en el punto 1, donde la producción de energía alcanza su punto máximo. Dicha granja estaría constituida de un número específico de dispositivos en función de la demanda energética requerida. Los dispositivos, además, deberían estar orientados hacia el suroeste de forma que las olas incidan de forma directa.

Si se tuviera que hacer un predimensionamiento del número de dispositivos que se deberían utilizar en el punto 1, tendríamos que basarnos en los datos poblacionales y energéticos de Madagascar expuestos previamente en el capítulo 3, apartados 3.1 y 3.2. Además, hay que considerar la cantidad de acceso energético que se desea aumentar mediante el empleo de este tipo de tecnología. A groso modo, en la tabla 16 se muestra un cálculo hecho a partir de la información anterior en función de un aumento del 5, 10 y 15% del acceso eléctrico nacional con la implementación de estos dispositivos y, teniendo en cuenta que, en la situación actual, 1 persona equivale a 48,53 kWh y un dispositivo *Wave Dragon* genera en ese punto 24,1 GWh.

*Tabla 16. Número de dispositivos en función del aumento del acceso a la electricidad.*

<b>Aumento del acceso a la electricidad (%)</b>	<b>Equivalente poblacional (habitantes)</b>	<b>Equivalente Energético (GWh)</b>	<b>Cantidad de dispositivos Wave Dragon</b>
5	1244728	60.41	3
10	2489455	120.81	5
15	3734183	181.22	8

En conclusión, una granja de dispositivos Wave Dragon en el punto 1 sería de gran ayuda para complementar al resto de energías renovables que se han empezado a desarrollar en Madagascar para abastecer la creciente demanda energética del país.

## 6. Conclusiones

En Madagascar no existe, a día de hoy, ningún tipo de plan energético, como en el caso de la Unión Europea; la cual tiene planeado que para el 2020 casi el 50% del territorio proceda de energías renovables. Es cierto, que los países externos al continente africano, tales como Estados Unidos o la Unión Europea, comienzan a invertir en éste para que a largo plazo pueda sufragar la creciente demanda de energía mediante el uso de fuentes alternativas para la generación de electricidad. En este momento, es cuando la energía del oleaje se hace presente en la escena mundial, ya que complementa de manera muy eficiente al resto de energías renovables como la eólica y la solar. Es una energía que no genera ningún tipo de gas de efecto invernadero durante su funcionamiento, su producción es continua y no depende de fuentes que se agoten y tiene un impacto medioambiental y visual muy bajo en comparación a los aerogeneradores eólicos, por ejemplo.

Además, dado que cerca del 40% de la población mundial vive en zonas litorales, este recurso puede llegar a suplir gran parte de la demanda. Su mayor punto débil, sin embargo, es lo poco desarrollada que está la tecnología en este campo ya que, a pesar de haber miles de patentes, apenas se ha llevado a cabo su comercialización y la mayoría de prototipos se encuentran en fase experimental. No obstante, aunque este sea el panorama actual, es cuestión de tiempo que los dispositivos WEC vayan mejorando y se hagan más económicos y eficientes.

El presente estudio tiene la intención de aportar luz sobre la investigación para hallar mejores soluciones en este campo. En él se ha estudiado el oleaje a partir del análisis de datos procedentes de modelado numérico y reanálisis (*ERA Interim*) durante el periodo 1979-2017 en 9 puntos del litoral malgache, con el objetivo de mostrar el mejor emplazamiento para el despliegue de dispositivos WEC, específicamente en este caso: *Pelamis* y *Wave Dragon*.

Tras analizar una gran cantidad de datos, se han descartado los puntos que no cumplían ciertos criterios dejando como potenciales los puntos del 1 al 3, localizados en la zona sur de la isla de Madagascar. Los otros puntos; situados al sureste, este y noreste son potencialmente menos explotables, ya que los coeficientes de capacidad, junto con la potencia producida, no llegan a ser tan altos como en los puntos seleccionados.

El oleaje, adopta la dirección suroeste como dominante, seguida de la sur-suroeste en la mayoría de puntos. El punto 1 ha resultado ser el punto con mayor potencial de explotación debido a su potencia media anual de 37,29 kW/m, superior a los máximos resultantes en estudios en otras partes del continente como Marruecos o en otras islas como las Islas Canarias. En base a esta información, se puede designar este punto como la mejor ubicación, pero es necesario calcular cuánta energía aporta cada punto mediante las matrices de producción de los dispositivos WEC, para asegurarse.

Cada WEC, dependiendo de qué clase de dispositivo sea, puede adaptarse mejor a un de oleaje u otro. Mediante este estudio, se ha podido observar como *Pelamis*, en esta ubicación, puede aprovecharse de la regularidad y estabilidad de las olas para producir energía, ya que su factor de capacidad máximo es de 27,09% y el mínimo exigido es de 20%. No obstante, en comparación con los resultados para el dispositivo *Wave Dragon*, no ha demostrado ser el más eficiente.

Por su parte, el *Wave Dragon* ha demostrado ser el dispositivo más eficiente entre ambos estudiados al tener un factor de capacidad de 35,28%, superior al mínimo óptimo de 30%. Este WEC resultaría altamente productivo al ser capaz de generar un aporte energético de 24,1 GWh por año. También podría ser factible el despliegue de WECs de tipo *Wave Dragon* en el resto de puntos sureños, ya que superan el 30% de factor de capacidad.

En conclusión, por el hecho de aprovechar de una forma más eficiente que los demás puntos la energía del oleaje, la opción más factible es la instalación de un dispositivo WEC; de carácter Terminador *Wave Dragon* en el punto 1, con orientación suroeste.



## 7. Bibliografía

- [1] Acciona, “La importancia de las energías renovables | ACCIONA,” *Acciona website*. [Online]. Available: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>. [Accessed: 06-Jun-2017].
- [2] Agencia Internacional de Energía (AIE), “Agencia Internacional de Energía.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/>. [Accessed: 03-Jun-2017].
- [3] National Geophics España, “El cambio climático es una realidad,” *Natl. Geogr. España*, 2015.
- [4] IPPC, “IPPC - Intergovernmental Panel on Climate Change.” [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch/>. [Accessed: 26-May-2017].
- [5] tecnoceano.com, “Energía Mareomotriz.” [Online]. Available: <http://blog.tecnoceano.com/?p=234>. [Accessed: 27-May-2017].
- [6] Pedro Ibañez Ereño (Tecnalia), “Xornada sobre Enerxia que Vén do Mar - Energías de las olas: situación y futuro.,” 2008, p. 70.
- [7] EMEC: European Marine Energy Centre, “Marine Energy.” [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>. [Accessed: 23-May-2017].
- [8] www.twenergy.com, “La Energía Azul,” 2012, 2012. [Online]. Available: [www.twenergy.com](http://www.twenergy.com). [Accessed: 24-May-2017].
- [9] www.energiasrenovablesinfo.com, “Energía de las olas: ventajas e inconvenientes,” 2014. [Online]. Available: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/oceanica/energia-olas-ventajas-inconvenientes/>. [Accessed: 06-Jun-2017].
- [10] www.piposystems.com, “Tecnologías del oleaje.” [Online]. Available: <http://www.piposystems.com/energiaOlas.php>.
- [11] Evans D, “The oscillating water column wave energy device,” *J. Inst. Maths Applies*, vol. 22, pp. 423–433, 1978.
- [12] B. Drew, A. . Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *J. Power Energy*, vol. 223, pp. 887–902, 2009.
- [13] EMEC: European Marine Energy Centre, “Wave devices,” *EMEC website*. [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>. [Accessed: 06-Jun-2017].
- [14] www.aquaret.com, “Marine Energy Converter Devices,” 2012, 2012. [Online]. Available: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com). [Accessed: 23-May-2017].
- [15] AWS, “Archimedes Waveswing.” [Online]. Available: <http://www.awsocan.com/>. [Accessed: 27-May-2017].
- [16] Wave Dragon, “Wave Dragon - Technology,” *Wave Dragon website*. [Online]. Available: [http://www.wavedragon.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=4&Itemid=35](http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=35). [Accessed: 05-Jun-2017].
- [17] EMEC: European Marine Energy Centre, “Aquamarine Power,” *EMEC website*. [Online]. Available: [www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/](http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/). [Accessed: 05-May-2017].
- [18] Grupo Undimotriz, “Energías renovables en el medio marino,” 2017, 2017. [Online].

- Available: <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/?p=1012>. [Accessed: 23-May-2017].
- [19] Ocean Power Technologies, "Ocean Power Technologies," 2015, 2017. [Online]. Available: <http://www.oceanpowertechnologies.com>. [Accessed: 25-May-2017].
- [20] EMEC: European Marine Energy Centre, "Pelamis Wave Power," *EMEC website*. [Online]. Available: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>. [Accessed: 05-Jun-2017].
- [21] The World Bank, "Madagascar - Country Data," *The World Bank website*. [Online]. Available: [data.worldbank.org/country/madagascar](http://data.worldbank.org/country/madagascar). [Accessed: 04-Jun-2017].
- [22] J. P. Praene *et al.*, "Electricity generation from renewables in Madagascar: Opportunities and projections," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. October 2016, pp. 1066–1079, 2017.
- [23] L. Andrianavo and V. J. Ramasiarino, "Geothermal Energy Resources of Madagascar - Country Update," *World Geotherm. Congr. 2015*, no. April, p. 6, 2015.
- [24] U.S. Agency for International Development, "U.S. Agency for International Development." [Online]. Available: <https://www.usaid.gov/>. [Accessed: 23-May-2017].
- [25] U.S. Agency for International Development, "Power Africa in Madagascar," 2017. [Online]. Available: [www.usaid.gov/powerafrica/madagascar](http://www.usaid.gov/powerafrica/madagascar). [Accessed: 20-May-2017].
- [26] L. J. Wang X, Fragano F, Gehringer M, Johnson T, Lecaros F, Lima E, "Drilling down on geothermal potential: an assesment for Central America," 2012.
- [27] ADER, *Madagascar wind atlas*. 2012.
- [28] W.- UNESCO and C. Magori, "Tidal Analysis and Prediction in the Western Indian Ocean," no. July, p. 43, 2008.
- [29] ECMWF, "ERA Interim Daily Data," *ECMWF website*. [Online]. Available: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>.
- [30] M. D. GJ Komen, L Cavaleri, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge, 1996.
- [31] SADC: Southern African Data Centre for Oceanography, "SADCO - Data Access," *SADCO website*, 2008. [Online]. Available: [sadco.csir.co.za/inventory.html](http://sadco.csir.co.za/inventory.html).
- [32] J. P. Sierra, C. Martín, C. Möso, M. Mestres, and R. Jebbad, "Wave energy potential along the Atlantic coast of Morocco," *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 20–32, 2016.
- [33] J. P. Sierra, C. Möso, and D. González-Marco, "Wave energy resource assessment in Menorca (Spain)," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 51–60, 2014.
- [34] C. Möso, M. Mestres, J. P. Sierra, and D. González-Marco, "Evaluation of wave energy and tidal stream resources in Bilbao (N Spain)," *Proc. 11th Eur. Wave Tidal Energy Conf.*, pp. 5–12, 2015.
- [35] A. S.-A. J.P. Sierra, D. González-Marco, J. Sospedra, X. Gironella, C. Möso, "Wave energy resource assessment in Lanzarote," 2013.
- [36] E. G. S. C. Rusu, "Wave energy pattern around the Madeira Islands," vol. 45, no. 1, p. 14, 2012.